

Специализиран научен съвет по електротехника при ВАК

Станимир Трифонов Вичев

Моделиране на входни величини за релейни защиты

Автореферат

на

Дисертация

за получаване на научната степен

“доктор на техническите науки”

Научна специалност 02.06.02:

“Електрически централи и подстанции”

Рецензенти:

проф. д.т.н. Лазар Тодоров Петканчин

проф. д.т.н. Сава Петров Папазов

проф. д-р Петко Петров Нотов

София, 2001 г.

Дисертационният труд е обсъден и представен за защита от катедрен съвет на катедра “Електроенергетика” при ТУ – София, разширен с участието на специалисти от други катедри и звена от Националната електрическа компания.

Авторът работи в катедра “Електроенергетика” при ТУ – София. Изследванията от дисертационния труд са извършени в същия университет и в звена от електроенергийната система на Република България.

Данни за дисертационния труд:

Дисертационният труд съдържа 236 страници, 150 фигури, 20 таблици, 503 заглавия на използвани литературни източници, 31 публикации на автора, едно авторско свидетелство за изобретение и 470 страници приложения в отделен том.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 11.12.2001 г. от 17,30 часа в зала 12126 на ТУ – София на заседание на СНС по електротехника при ВАК. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехническият факултет, стая 12222, Студентски град, 1000 София.

Автор: Станимир Трифонов Вичев

Заглавие: Моделиране на входни величини за релейни защиты

Технически редактор:

Тираж: 200

Излиза от печат на

Печатна база при ТУ – София

Предговор

В дисертационния труд се разглежда в обобщен и систематизиран вид моделирането на входните величини за релейните защиты.

В първа глава е разгледано състоянието на моделирането на входните величини за релейните защиты, анализирана е литературата по този въпрос и са определени целта и задачите на дисертационната работа. Също в глава първа са споменати използваните методи за моделиране и някои техни особености.

Проведените изследвания в рамките на представения научно-изследователски труд са обособени в четири части.

Първата част се отнася до входните токове и включва главите от втора до пета. Разглежда се определянето в експлоатационни условия на параметрите на токовете трансформатори и трансформаторите тип Феранти, дефинирани са и са реализирани лабораторно входни токове, съставени са адекватни математически модели и се прави числено определяне на преходния първичен ток при късо съединение.

Втората част се отнася до входните напрежения и включва главите от шеста до осма. Обект на разглеждане са индуктивните и капацитивни напрежителни трансформатори. Разглежда се определянето на параметрите им, работата на индуктивните трансформатори в установен и преходен режим и се анализира особен случай на деформирано, капацитивно прехвърлено напрежение. Работата на капацитивните трансформатори се моделира в установен режим.

В третата част (от гл. 9 до гл. 12) са систематизирани резултати от математическото и физическо моделиране и измерване директно в електроенергийната система на входни величини на земни защиты в разпределителни мрежи. Предлага се също нов алгоритъм за такава защита, нейното реализиране и изпитване в лабораторни условия.

Четвъртата част (от гл. 13 до гл. 15) е посветена на моделирането на входните величини за защита при загуба на възбуждане на синхронни генератори. Математически е моделиран определен синхронен генератор, фиксирани са типични ситуации при загуба на възбуждане и са намерени ходографите на входните величини. На базата на синтезирани комплексни области при авария е представен нов алгоритъм за цифрова защита.

В последната глава на всяка част се прави обобщение на постигнатите резултати от изследванията в нея и се посочват тези от тях, които могат да се оценят като приноси на автора.

В заключение са сумирани резултатите от четирите части и основните приноси на автора.

Като приложения, в отделен том, са дадени подробни резултати от изчисления по съставените математически модели, от серии измервания в електроенергийната система и в лаборатории. Номерата на приложенията съответстват на номерата на точката от дисертацията, за която се отнасят. По същия начин са номерирани фигурите, формулите и таблиците в текста.

Цел и задачи на дисертационната работа

Въз основа на проучването и анализа на състоянието на моделирането на входните величини за релейните защиты в първа глава са дефинирани целта и основните задачи на настоящата дисертационна работа.

Предмет на дисертацията са основно входните величини на релейните защиты в разпределителните мрежи. Включени са също някои входни величини на трансформаторни и генераторни защиты, както и входни величини за електромери.

Целта на дисертацията е създаване на адекватни математически модели на преобразователите на ток и напрежение, които осигуряват входните величини за релейните защиты. Цел е също след подробно изучаване на входните величини за земните защиты в мрежите средно напрежение и защитите при загуба на възбуждане на синхронните генератори да се предложат алгоритми за селективни цифрови защиты в тези два случая.

Задачите на дисертацията се разделят на четири групи и на всяка от тях отговаря отделна част от разработката.

I. Входни токове

В областта на токовете трансформатори и трансформатори тип Феранти:

- I-1. Да се разработят нови начини за определяне в условията на експлоатация на параметри и характеристики, необходими за математическо моделиране на токови трансформатори и трансформатори тип Феранти. Да се разчита на възможностите на цифров запис на токове и напрежения.
- I-2. За целите на съвременните релейни защиты да се изучат характерни входни токове за токовете трансформатори като токове на включване на празен ход на силови трансформатори, токове с апериодични съставки, деформирани периодични токове, токове при включване на електропроводи и др.
- I-3. За оценка на ролята на токовете трансформатори тип Феранти при създаване на нови селективни земни защиты да се намерят най-неблагоприятните за работата им в установен и преходен режим токове на земно съединение като токовете при точна компенсация, токове при прекъсващи дъги и др.
- I-4. Да се съставят нови математически модели на токовете трансформатори и токовете трансформатори тип Феранти за работа в установени и преходни режими, за линейни и нелинейни магнитопроводи, за произволни по форма входни сигнали.
- I-5. Да се изучат особеностите при натоварване на токовете трансформатори и токовете трансформатори тип Феранти с цифрови защиты и с комбинация от цифрови и конвенционални защиты.
- I-6. Да се създадат условия чрез лабораторни експерименти да се определя адекватността на математическите модели. За земните защиты да се създадат входни токове и напрежения, които в лабораторни условия да имитират пълно условията на реалните мрежи средно напрежение.
- I-7. Да се намерят случаи, когато първичните токове на токовете трансформатори и токовете трансформатори тип Феранти могат да се намерят аналитично по познати вторични токове и данни за трансформатора. Да се съставят макар и по-бавни, но по-точни алгоритми за случаите, когато не е необходимо да се преследва бързодействие като за релейни защиты, каквито са случаите на измерване на разстоянието до мястото на късото съединение, участие в информационна система и оценка на качеството на електроенергията.

II. Входни напрежения

В областта на индуктивните и капацитивните напрежителни трансформатори:

- II-1. Да се разработят начини за определяне в условията на експлоатация на параметри и характеристики, необходими за математическо моделиране на индуктивни и капацитивни напрежителни трансформатори. Да се разчита на възможностите на цифров запис на токове и напрежения.
- II-2. Да се систематизират характерни входни напрежения, които при преобразуване от индуктивни и капацитивни напрежителни трансформатори създават нетипични условия за работа на релейните защиты и опасност за нарушаване на сигурността, чувствителността и бързодействието им.
- II-3. Да се създадат нови математически модели за симулиране на работата в установен и преходен режим на индуктивни и капацитивни напрежителни трансформатори. За относително новите за нашата електроенергийна система капацитивни напрежителни трансформатори да се съставят подходящи еквивалентни схеми и да се съпостави работата им с тази на индуктивните напрежителни трансформатори.

III. Входни величини на земни защиты в разпределителни мрежи

С цел да се изучат входните величини и да се предложи нов алгоритъм за селективна земна защита:

- III-1. Да се състави реална картина за входните величини за земните защиты в електроенергийната система на Република България чрез използване на шлейфови и цифрови осцилографи и цифрови регистратори на повреди. Обективност да се постигне чрез регистриране на токове и напрежения при естествени и изкуствени земни съединения. Специално внимание да се обърне на земните съединения (з.с.) през прекъсваща дъга.
- III-2. Да се създадат подходящи математически модели на разпределителните мрежи, за да се изследват пълно различните режими на неутралата, на захранването и влиянието на всички участващи параметри. Моделите да имат доказана обусловеност, а резултатите да се сравнят с експерименти. Да се моделират адекватно и з.с. през прекъсваща дъга.
- III-3. Физическите модели в лаборатория “Релейна защита” на ТУ – София да създават входни величини, които по големина и формата да съответстват на първичните токове при реални з.с., а за напреженията – на вторичните. Специално внимание да се обърне на физическото моделиране на з. с. през прекъсваща дъга.
- III-4. Мрежите със заземяване през неголямо активно съпротивление да се изследват с оглед оценяване на работата на защитите им в преходен режим и при значими преходни съпротивления.
- III-5. Да се избере група от сигнали за оценка на поведението в установен и преходен режим на съществуващи, разработвани и купувани нови земни защиты.
- III-6. Да се предложи алгоритъм на многокритериална земна защита, която да гарантира сигурност и чувствителност при всички режими на работа на неутралата.

IV. Моделиране на входните величини за защита при загуба на възбуждане на синхронни генератори

С цел да се изучат входните величини и да се създаде нов алгоритъм на цифрово устройство за улавяне на асинхронен режим, осигуряващо максимално бързодействие, селективност и чувствителност на защита при загуба на възбуждане:

- IV-1. Да се създаде подходящ за моделиране на входните величини в устройството за улавяне на асинхронния режим математически модел на синхронен генератор, тип ТВВ-220-2А с използване на уравненията на Парк.
- IV-2. Да се изучат ходографите на входните величини, импедансите и мощностите при различни по характер повреди във възбудителната система, различни реални изходни режими на генератора и различни връзки със системата.
- IV-3. Да се намери областта в комплексната равнина, която трябва да бъде обхваната от характеристиката на устройството за улавяне на асинхронния режим, за да се осигури максимално бързодействие, селективност и чувствителност на нова цифрова защита при загуба на възбудяване.

Научната актуалност и значимост на изследването са свързани с проектирането и експлоатацията на конвенционалните и цифровите релейни защиты и стремежът те да имат максимална селективност, чувствителност, точност и бързодействие. Функциите на цифровите защиты включват измерване на входните величини, оценка на качеството на електроенергията и регистриране на събития в електроенергийната система, което увеличава значението на адекватността между реалните и постъпващите в защитите сигнали.

Част първа. Входни токове

2. Глава втора. Изследване на токовете трансформатори като източник на входни величини за релейните защиты

2.1. Параметри на токови трансформатори

В условията на експлоатация параметри на токови трансформатори (ТТ) могат да се измерят чрез използване на товарни устройства, амперметри и волтметри, мостове за постоянен ток, цифрови осцилоскопи и съответен софтуер.

Специален интерес представлява записването с цифров осцилоскоп на характеристиките “напрежение-ток” при захранване от вторичната страна и отворена първична намотка. Това дава възможност:

- да се определи ефективната стойност на величините независимо от формата им;
- да се измери фазовата разлика между напрежението и тока чрез моментите на пресичане на нулата;
- да се проведе хармоничен анализ и изчисли фазовата разлика между съответстващите си двойки напрежение и ток;
- да се проведе филтриране на величините при наличие на смущения;
- да се построи хистерезисния цикъл.

Има възможност да се разшири традиционното използване на характеристиките “напрежение-ток” за намиране на грешката при зададен вторичен ток и товар с намиране на допустимата кратност на първичния ток при зададен товар и намиране на допустимия товар при зададен първичен ток и допустима грешка. Тези възможности са полезни и при оценка на качествата на широко използваните в електроразпределението ТТ за ниско напрежение

Построяване на хистерезисни цикли по данни от характеристиката “напрежение-ток”

Предлага се трите основни нелинейности на феромагнитиците (насищане, загуби в стомана и хистерезис) да се определят в експлоатационни условия от данни за характеристиката “напрежение-ток”. Ако решението използва зависимостта “поток-ток” се избягва необходимостта от познаване на геометрията на магнитопровода и броя на навивките.

Разсейването на вторичната намотка на ТТ с тороидален навит магнитопровод се пренебрегва, а активното съпротивление се измерва. При ядрените наредени магнитопроводи, за да се отчете приблизително разсейването, се приема съотношението $R_2/Z_2=0,8$, така че и при двата ви-

да магнитопроводи може да се намери електродвижещото напрежение (е.д.н.) на намагнитващия клон от Т-еквивалентната схема на трансформатора

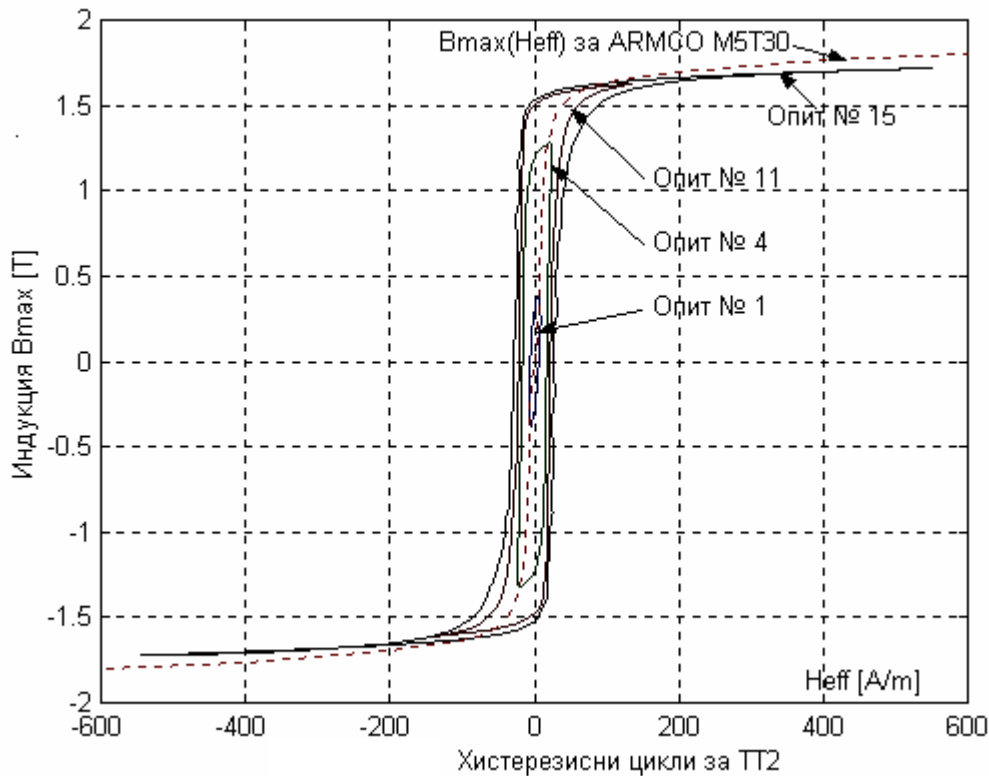
$$(2.1.3.1) \quad e_2 = u_2 - Z_2 i_2.$$

При известно напрежение $e_2(t)$ и ток $i_2(t)$ може да се определи пълният поток $\Psi(t)$. В програмната среда Matlab се избира един период от записаното напрежение $u_2(t)$ и ток $i_2(t)$. Броят на записаните точки N за един период T се избира според деформирането на величините. С командата $\text{cumsum}(e_2 * T / N)$ се решава интегралът

$$(2.1.3.2) \quad \Psi = \int_0^T e_2(t) dt = \text{cumsum}(e_2 * T / N).$$

Процедурата може да спре до тук, защото при решаване на практически задачи от моделиране на нелинейни вериги с феромагнетици е необходимо да се познава зависимостта “пълен поток-ток” $\Psi(i)$. Ако се познават геометричните размери на магнитопровода и броят на навивките, може да се намери магнитната индукция B_{\max} и напрегнатостта H_{eff} и да се начертае за един период хистерезисен цикъл за конкретната записана двойка характеристики (u_2, i_2) .

Пример за построяване на хистерезисни цикли е разработен за ТТ за 20kV. Той има след-



Фиг. 2.1.3.2. Хистерезисни цикли за четири опита с различна максимална магнитна индукции

ните данни: брой на намотките $w_1/w_2=15/60$; материал на магнитопровода ARMCO M5T30; сечение на магнитопровода $s_{\text{Fe}}=0.001323\text{m}^2$; средна дължина на магнитопровода $l_m=0,36\text{m}$; номинален товар 30VA (1.2Ω).

Процедурата за построяване на хистерезисни цикли е следната.

- Снемане на характеристиката “напрежение-ток” със записване чрез цифров осцилоскоп на двойките стойности $(i_k(t), u_k(t))$, където k е поредният номер на опита. В разглеждания пример са проведени 15 опита. Последният опит №15 отговаря на най-високата стойност на индукцията, а първият №1 – на най-малката.
- Отделяне на един период от двете величини и филтриране на данните, ако има смущения. Фиг. 2.1.3.2 за опити №1, 4, 11 и 15 отговаря на филтрирани величини.

- с) Пресмята се стойността на B_{\max} и H_{eff} за всяка измерена моментна стойност. Получените зависимости $B_{\max}(t)$ и $H_{\text{eff}}(t)$ са с еднаква дължина.
- д) Построява се хистерезисен цикъл $B_{\max}(H_{\text{eff}})$.

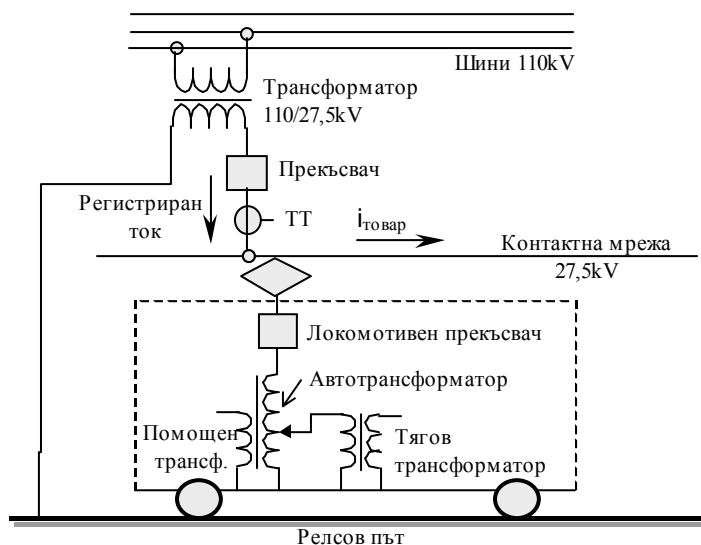
Изборът на използвания един период от записа за тока и напрежението не е произволен. За начало трябва да се приеме момент, когато кривата на напрежението минава през максимума. В противен случай цикълът няма да бъде симетрично разположен спрямо оста на H_{eff} .

На фиг. 2.1.3.2 са показани получените хистерезисни цикли за 4 от опитите. Максималните им индукции са съответно 0,3860Т, 1,5795Т, 1,6270Т и 1,7177Т. За сравнение е показана и основната крива на намагнитване на материала ARMCO M5T30, снета при 50Hz от завода-производител.

2.2. Характерни входни сигнали за токовите трансформатори

2.2.1. Пресмятане на тока на включване на празен ход на силов трансформатор чрез програмния продукт ЕМТР/АТР

Силовите трансформатори се разглеждат като индуктивности с феромагнитна сърцевина, присъединени към източник на синусоидално напрежение. Отчитат се и импедансите на електроенергийната система по отношение на възела, към който е присъединен трансформаторът. Трансформаторите се описват като линейни надлъжни елементи и нелинейни елементи към земя. Заместващата схема зависи също от броя и начините на свързване на намотките. За честоти до няколко kHz трансформаторните капацитети могат да се пренебрегнат. Това е допустимо и при включване на празен ход.

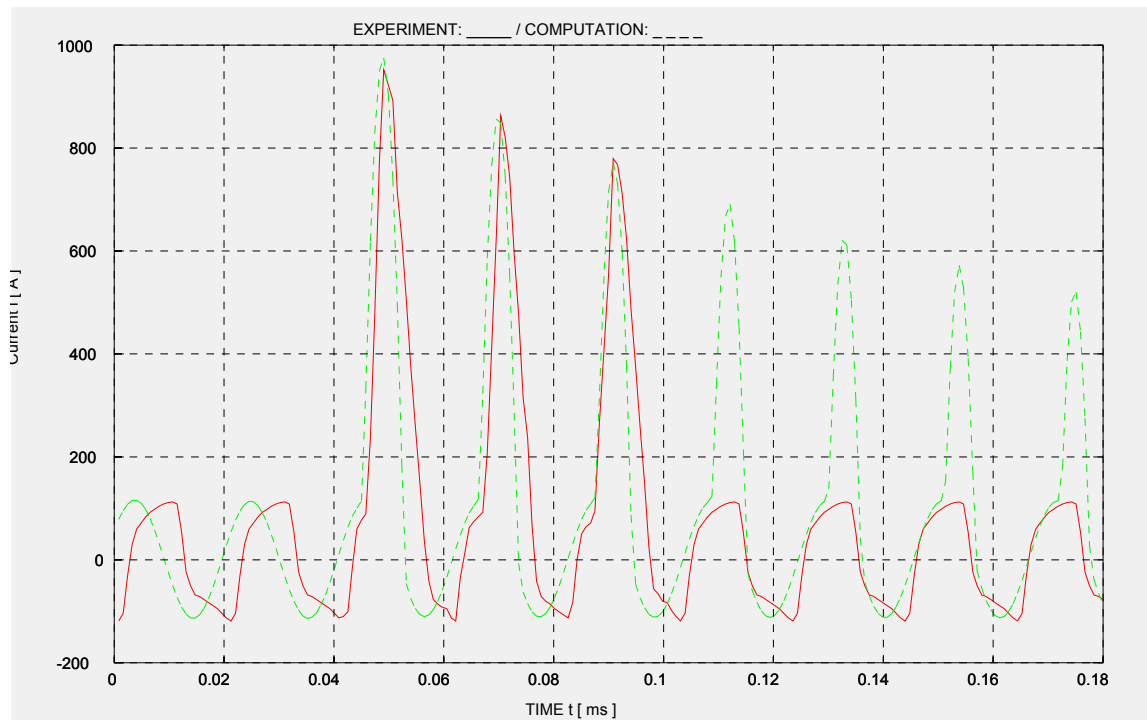


Фиг. 2.2.1.3.

В съответствие с препоръките в ЕМТР/АТР линейната част на трансформаторите се моделира със следните две матрици: диагоналната матрица на съпротивленията $[R]$ и матрица-та на реципрочните стойности на входните и взаимните индуктивности $[L^{-1}]$. Кривата на намагнитване $B(H)$ трябва да бъде получена за предпочитане от експерименти върху същия трансформатор. В много случаи е възможно да се използва експерименталната характеристика на празен ход $U_{\text{rms}}(I_{\text{rms}})$ или характеристиката $\Psi_{\text{peak}}(I_{\text{peak}})$ на нелинейната зависимост на потока от тока и нелинейната индуктивност на намагнитването L_{μ} .

С цел да се намерят причините за неселективното изключване на мрежата 27,5kV на БДЖ е проведен експеримент по фиг. 2.2.1.3, а на фиг. 2.2.1.4 е показан един от експерименталните резултати. Типично за този случай е също наличието на периодичен, но несинусоидален ток на товара.

Изследваният еднофазен тягов трансформатор има напрежение на късо съединение (к.с.) $u_{\text{к.с.}}=1,93\%$ между първичната (27,5kV) и помощната (1,507kV) намотки. Загубите на к.с. са $\Delta P_{\text{М}}=2040\text{W}$ при 16°C . Загубите на празен ход са $\Delta P_{\text{СТ}}=1950\text{W}$. Геометрията на магнитопровода е известна с голяма точност. Стоманата (ARMCO M5T30) и броят на навивките на намотките също са известни. На базата на тези параметри е изготвен изчислителният модел на трансформатора с еквивалентна характеристика на празен ход $\Psi_{\text{peak}}(I_{\text{peak}})$.



Фиг. 2.2.1.4. Сравнение на резултати от експеримент и изчисление.

Експеримент: —; Изчисление: - - - ;

$S=2,23\text{MVA}$; $\cos\varphi=0,85$; $t_0=40-2,6=37,4\text{ms}$. Липсва кондензаторна батерия

Резултатите, получени от експеримента за максималните стойности на първите три периода са $i_{\text{peak1}}=952\text{A}$, $i_{\text{peak2}}=846\text{A}$ and $i_{\text{peak3}}=748\text{A}$. Те са много близки до изчислението (фиг. 2.2.1.4) Моментът на включване t_0 настъпва 2,6ms преди момента, в който напрежението на синусоидалния източник на напрежение минава през нулата.

С цел да се определят най-големите преходни токове, изчисленията са проведени с момент на включване t_0 , при който синусоидалното напрежение минава през нулата.

Влияние на различни фактори върху преходния ток:

- Големина на напрежението. При най-ниското ниво на напрежението 19kV преходният ток е пренебрежим, но той достига 1600A при максимално допустимо ниво на напрежението 29kV.
- Максимално допустим товар. Създава се от друг локомотив – 6,3MVA при $\cos\varphi=0,85$ и при максималното напрежение 29kV.
- Компенсация с кондензаторни батерии. Разгледани са три случая – мощност 900, 1800 и 2700kVA_r. Включването на празен ход при наличието на кондензаторни батерии може да предизвика резонанс.
- Анализ на висшите хармоници. Пресмятането е при максималното напрежение 29kV за първите 15 хармоника. Вторият от хармониците представлява интерес за блокировките на трансформаторните диференциални защиты, а за случая на еднофазен тягов товар 3-ят хармоник е важен за настройките на фидерните токови защиты, които имат блокировка при наличие на трети хармоник.

Доброто съвпадение между експерименталните и изчислителните резултати доказва ползата от приложението на програмата ЕМТР/АТР за задачи, касаещи електромагнитните преходни процеси в ЕЕС.

Освен с ЕМТР/АТР е проведено моделиране на процесите на включване на трансформатор на празен ход за нуждите на обучението. Използвана е приведена Т-схема, паралелно представяне на напречния клон, аналитично апроксимиране на зависимостта “поток-ток” и интегриране по метода Рунге-Кута. Предложени са също аналитични изрази за приблизително

описание на преходния намагнитващ ток, които са удобни за проверка на работни версии на нови програми.

2.2.2. Лабораторно реализиране на преходни токове за директно изпитване на релейни защиты и измервателни трансформатори

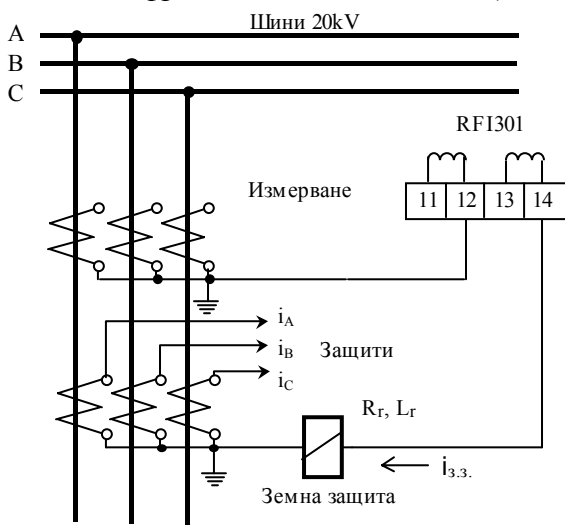
В лаборатория “Релейна защита” са създадени устройства за симулиране на преходни токове и напрежения за директно изпитване на релейни защиты, електромтери и други елементи на вторичната комутация в електрическите централи и подстанции. Апаратурата за лабораторното симулира на входните величини на земните защиты в разпределителните мрежи, включително и на земните съединения при прекъсваща дъга, е описана в т. 10.2.

2.2.3. Особени случаи на входни сигнали

А. Високочестотни входни токове в нулевите вериги на токови трансформатори

Разгледан е практически случай на поява на пренапрежения в токовите вериги на цифрова защита на извод средно напрежение при комутация на извода и при земни съединения. Принципната схема е показана на фиг. 2.2.3с.1.

В цифровата защита RFI-301 (РОКОН-София), избрана като пример, постъпва информация от ядрата за защита и ядрата за измерване, обстоятелство, което не се среща при конвенционалните защиты.



Фиг. 2.2.3с.1. Принципна схема

В случая двете нулеви вериги имат различие в импедансите поради включване на допълнително токово реле за земна защита с параметри R_r и L_r . Това прави потенциалите спрямо земя на съседните клемите 12 и 13 различни. Между клемите 11 и 12, както и между 13 и 14 има само няколко навивки на първичната намотка на междинните токови трансформатори и потенциалите им могат да се приемат за еднакви.

Разгледани са пренапреженията, които се получават между двете клемите на защитата 12 и 14 или равностойно като потенциал между клемите 12 и 13, свързани към нулевите вериги на двете ядра на токов трансформатор, при различни преходни процеси в защитавания електропровод. При всички

проведени опити се използват цифрови осцилоскопи за регистриране на преходните токове и напрежения и подходящ софтуер за прехвърляне, обработване и онагледяване на резултатите с персонален компютър.

В преходния режим потенциалната разлика u_{12-13} се дължи на пада върху релето за земна защита

$$(2.2.3с.1) \quad u_{12-13} = R_r \cdot i + L_r \frac{di}{dt}$$

Регистрира се в цифров вид токът i през релето. Неговата производна di/dt се пресмята с приближение чрез крайните разлики $\Delta i/\Delta t$

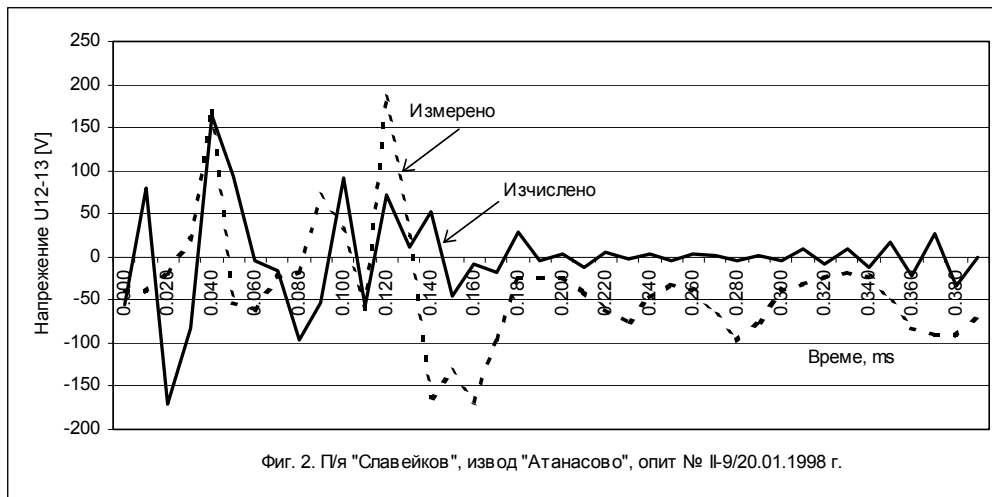
$$(2.2.3с.2) \quad \frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i(k+1) - i(k)}{\Delta t},$$

където: k е поредният номер на точка от масива данни за измервания ток,

Δt – интервалът от време между две съседни точки (от 10^{-4} до 10^{-5} s).

Реализирани са режими “включване” и “изключване” на електропровода 20kV в нормална експлоатация. По-значимите измерени пренапрежения u_{12-13} са от 538V до 1196V, а честотата на тези импулси е от 1280 до 18000Hz. Процесите са случайни и се знае, че не са достигнати екстремалните стойности от 3,5 – 4,5kV.

При един от опитите (включване на електропровод) е измерено максимално напрежение $u_{12-13} = 586V$. Част от този запис, който не включва максималното напрежение е показан на фиг.



Фиг. 2.2.3с.2.

2.2.3с.2. За този интервал (0,38ms) е получен числено и токът $3i_0 = i_A + i_B + i_C$, намерена е числено и неговата производна (2.2.3с.2) и се пресмята падът върху включеното реле за земна защита (2.2.3с.1), който обуславя и напрежението u_{12-13} . Параметрите на конкретното токово реле са: $Z_r = 0,02063\Omega$; $R_r = 0,01412\Omega$; $L_r = 54,97\mu H$, а ъгълът $\varphi_r = 46,8^\circ$. Изчисленото пренапрежение u_{12-13} е показано на същата фигура. Съвпадението на изчисление и измерване е твърде грубо, но причините за това са обективни: получаване на тока с нулева последователност с изчисление (сумиране на трите фазни тока), а не чрез директно измерване и провеждане на числено диференциране, което винаги води до голямо разсейване на резултатите.

В. Регистриране на токове при естествени еднофазни и междуфазни повреди

Като резултат от анализа на тези записи се констатира: правилността на настройките и действието на защитите; характерът на входните величини в преходен режим; влиянието на ударния ток при включване на трансформаторите върху сумарния фазен ток; разликата между тока на нулева последователност, получен от филтър на тока с нулева последователност и същият ток, но получен от сумиране на моментните стойности на трите фазни тока; реалното присъствие на несиметрия при двуфазни и трифазни повреди.

С. Регистриране на токови импулси, предизвикващи излишно отчитане на цифрови електромери

На електропровод 110kV напрежителните вериги на електромерите са включени, а прекъсвачът е изключен и първичните токови вериги са прекъснати. От анализа на регистрираните входни величини следва: а) Токови импулси се появяват почти всеки положителен полупериод на напрежението. Те всеки път са различни по амплитуда (измерени са до 0,12 A), по форма и по продължителност (от 72,3ns до 150mks). б) Честотата на колебанията вътре в импулса е около 200kHz. в) За едноседмичен период цифровите електромери отчитат видимо енергия. г) Записаните входни сигнали дават възможност да се предприемат технически или организационни мероприятия за премахване на допусканите грешки при отчитане на електроенергията.

Д. Входни величини при защита на асинхронни генератори (Микро-ВЕЦ)

Регистрирани са величини на нормален режим и аварийен случай, когато асинхронният генератор (Микро-ВЕЦ "Чукура" на водите от водоснабдяване на гр. Велинград) заедно със свързващия го с ЕЕС електропровод 20kV и неговите товари и кондензаторни батерии работи трайно без връзка с ЕЕС. Установено е случайно съвпадение на капацитивната мощност, генерирана от електропровода и работещи кондензаторни батерии и индуктивната мощност, необходима за товарите и асинхронния генератор. Такъв режим води до нарушаване на правилата за техническа безопасност. Налага се търсене на характеристични величини, които да водят селективно до изключване на Микро-ВЕЦ, когато отпадне връзката със системата.

Констатациите са следните: а) В нормален режим напрежението се колебае от 215V до 235V. За нивото на напрежението е правен и едноседмичен запис. б) В самостоятелен режим Микро-

ВЕЦ дава чести отклонения на напрежението до около 155V за около 1s. *c)* В самостоятелен режим Микро-ВЕЦ дава краткотрайни отклонения на честотата от 43,5 до 99Hz. *d)* Не се наблюдава поява на висши хармоници в тока и напрежението, които да могат да се използват за селективно определяне на режима на самостоятелна работа. *e)* Не се наблюдава и поява на несиметрия в тока и напрежението.

Предлага се самостоятелният режим на Микро-ВЕЦ да се разпознава чрез следните отклонения на входните величини на защитите: *a)* Спадане на напрежението под 190V или покачване над 250V независимо от продължителността на отклонението. *b)* Спадане на честотата под 48,5Hz или покачване над 51,5Hz независимо от продължителността на отклонението. *c)* При режим на пускане тази автоматика трябва да се извежда. За целта може напрежителните вериги да се захранват от страната на системата.

Е. Несинусоидални токове и напрежения в тягови подстанции

Измерване на хармоници са проведени в три тягови подстанции: "Белово", "Карлово" и токоизправителна станция - гр. Пазарджик.

Измерванията се провеждат на това ниво на напрежението, където се измерва електрическата енергия. Обобщаването на резултатите от измерване на хармоници е проведено по коефициента на несинусоидалност по ток.

Общо максималната и минималната несинусоидалност на тока са съответно 71,08% и 19,51%.

Въпреки, че токовете са страна 27,5kV са силно деформирани, на страна 110kV напрежението има малка деформация – максималната е 10,98%, а минималната е нула.

В тягова п/я "Карлово" са записвани и входни величини при изкуствени к.с. на контактната мрежа.

2.3. Моделиране на токови трансформатори

Създаването на математически модели на ТТ е свързано с трудности, предизвикани от нелинейността и многозначността на характеристиките на използваните магнитни материали. Проблемите стават особено актуални в случаите на пресмятане на режимите при рязко изменение и произволна зададена форма на входните сигнали. В този случай се налага поради незначителните загуби в междинните устройства (мощни трансформатори и преносни електропроводи, в които преходните процеси бавно затихват) изследването да се провежда за достатъчно голям интервал от време. При това проблемът за числената устойчивост на използвания метод придобива особено значение и се препоръчва използване на неявни методи за числено интегриране.

2.3.1. Дискретни резисторни модели на токови трансформатори

А. Дискретни резисторни модели на вериги с двунамотъчни трансформатори

Разглежда се двунамотъчен трансформатор (фиг. 2.3.1.1), преходният процес в който се описва със системата:

$$(2.3.1.1a) \quad u_1 = R_1 i_1 + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + w_1 s_m \frac{dB}{dt},$$

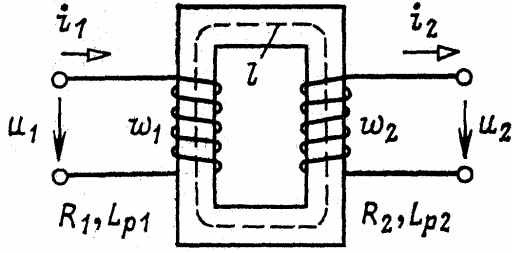
$$(2.3.1.1b) \quad -u_2 = R_2 i_2 + L_{2p} \frac{di_2}{dt} - w_2 s_m \frac{dB}{dt},$$

$$(2.3.1.1c) \quad w_1 i_1 - w_2 i_2 = Hl,$$

$$(2.3.1.1d) \quad B = B(H).$$

Диференцира се (2.3.1.1с) и се намира диференциалната абсолютна магнитна про-ницаемост $\mu_{\text{д}}(H)=dB/dH$. Записва се:

$$\frac{dB}{dt} = \mu_{\text{д}} \frac{w_1}{l} \cdot \frac{di_1}{dt} - \mu_{\text{д}} \frac{w_2}{l} \cdot \frac{di_2}{dt}.$$



Фиг. 2.3.1.1.

При заместване на горния израз в (2.3.1.1a) и (2.3.1.1b) и след преобразуване се стига до системата:

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_{p1} + L_{\text{д}1}) \frac{di_1}{dt} - M_{\text{д}} \frac{di_2}{dt},$$

(2.3.1.2b)

$$-u_2 = R_2 i_2 + (L_{p2} + L_{\text{д}2}) \frac{di_2}{dt} - M_{\text{д}} \frac{di_1}{dt}.$$

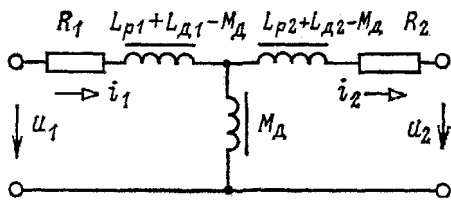
В (2.3.1.2) влизат диференциалните индуктивнос-

ти

$$(2.3.1.3) \quad L_{\text{д}1} = \frac{w_1^2 \mu_{\text{д}} S_M}{l}, \quad L_{\text{д}2} = \frac{w_2^2 \mu_{\text{д}} S_M}{l}, \quad M_{\text{д}} = \frac{w_1 w_2 \mu_{\text{д}} S_M}{l},$$

които са функция на напрегнатостта на магнитното поле H и на режима.

За получаване на неприведената еквивалентна схема от фиг. 2.3.1.2 към (2.3.1.2) се добавят нулевите суми: $M_{\text{д}} \frac{di_1}{dt} - M_{\text{д}} \frac{di_1}{dt}$ и $M_{\text{д}} \frac{di_2}{dt} - M_{\text{д}} \frac{di_2}{dt}$.



Фиг. 2.3.1.2.

Използва се преимуществото на неприведените схеми за определяне на началните стойности по об-общените правила на комутацията при включване на идеални индуктивни елементи към източник на ток.

За заместващите схеми с приведени величини също могат да се съставят резисторни модели.

В случай на изследване на единичен ТТ, включен към идеален източник на ток, параметрите на пър-вичната страна

$R_1, L_{p1} + L_{\text{д}1} - M_{\text{д}}$ не оказват влияние на преходния процес. При изследване на каскадно свързани ТТ, обаче е необходимо да се използва пълната схема от фиг. 2.3.1.2.

Известно е, че решението на диференциалното уравнение $dx/dt = f(x, t)$ по многостъпков неявен метод от p -порядък има вида:

$$x_{n+1} = b_{-1} T_f(x_{n+1}, t_{n+1}) + \sum_{k=0}^p [a_k x_{n-k} + b_k T_f(x_{n-k}, t_{n-k})],$$

където: a_k, b_k и b_{-1} са коефициенти; T - стъпка на интегриране; $t_{n+1} = t_n + T$.

Като се приложи тази процедура към зависимостта

$$u_s = L_{\text{д}s}(H) \frac{di_s}{dt} \quad \text{за } s=1, 2, 3 \text{ се получава}$$

$$i_{s,n+1} = b_{-1} T \frac{u_{s,n+1}}{L_{\text{д}s}(H_{n+1})} + \sum_{k=0}^p \left[a_k i_{s,n-k} + \frac{b_k T u_{s,n-k}}{L_{\text{д}s}(H_{n-k})} \right]$$

Обозначава се:

$$(2.3.1.4) \quad \hat{i}_s = \sum_{k=0}^p \left[a_k i_{s,n-k} + \frac{b_k T u_{s,n-k}}{L_{\text{д}s}(H_{n-k})} \right]$$

и след преобразуване се получава:

$$(2.3.1.5) \quad \hat{i}_{s,n+1} = \left[\frac{L_{\text{д}s}(H_{n-k})}{b_{-1} T} \right]^{-1} u_{s,n+1} \hat{i}_s$$

или

$$(2.3.1.6) \quad u_{s,n-1} - \hat{u}_s = \frac{L_{Ds}(H_{n+1})}{b_{-1}T} i_{s,n+1} = R(H_{n+1}) i_{s,n+1},$$

където:

$$(2.3.1.7) \quad \hat{u}_s = \hat{u}_s(H_{n+1}) \frac{L_{Ds}(H_{n+1})}{b_{-1}T} i_s = R(H_{n+1}) \hat{i}_s.$$

Уравнение (2.3.1.5) и (2.3.1.6) съответстват на дискретни резисторни модели на не-линеен индуктивен елемент. Разликата между тях е в това, че токът i_s на източника на ток не зависи от номера на поредната стъпка $n+1$, а напрежението u_s , заради напрегнатостта на магнитното поле H е нелинейна функция на H_{n+1} .

Дискретни резисторни модели могат да се съставят и за по-сложни схеми, например за каскадно и диференциално свързани ТТ.

В. Изчислителни особености

Характерно за дискретните резисторни модели е това, че някои линейни и нелинейни двуполусни елементи зависят както от първичния, така и от вторичния ток на съответния трансформатор. Такова явление трябва да се отчита на всяка стъпка във времето при съставянето на алгоритмите за анализ на схемите.

Необходимо е да се разполага със зависимостта на диференциалната магнитна проницаемост μ_d от напрегнатостта на полето H . Тъй като обикновено е зададена кривата на намагнитване $B(H)$, търсената зависимост $\mu_d(H)$ може да се получи с предварително проведено числено диференциране. При това

$$(2.3.1.9) \quad H = \frac{w_1 i_1 - w_2 i_2}{l}$$

Задачата се усложнява значително при многонамотъчни трансформатори с мантиен тип магнитопроводи. Такива случаи се срещат например при руските диференциални защиты с бързонасищащи се магнитопроводи и при всички защиты с междинни ТТ. И в този случай могат да се въведат диференциални собствени и взаимни индуктивности. Достатъчно е да се отчете (при пренебрегване на разсейването), че потокът, свързан с дадена намотка w_r , зависи от токовете i_1, i_2, \dots, i_N във всички намотки:

$$\Psi_r = \Psi_r(i_1, i_2, \dots, i_N).$$

Като се изчисли пълният диференциал $d\Psi_r$ се получава

$$(2.3.1.10) \quad d\Psi_r = \sum_{r=1}^N \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_r} di_r.$$

Собствените и взаимните индуктивности се означават като

$$(2.3.1.11) \quad L_r = \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_r}, \quad M_{rs} = \frac{\partial \Psi_r}{\partial i_s}$$

Напреженията могат да се получат чрез разделяне на (2.3.1.10) на dt , т.е.

$$(2.3.1.12) \quad u_{\Psi_r} = \frac{d\Psi_r}{dt} = L_r \frac{di_r}{dt} + \sum_{s=1}^N M_{rs} \frac{di_s}{dt}, \quad s \neq r.$$

По принцип чрез въвеждане на дискретни резисторни модели изследването на преходните процеси се свежда до анализ на постоянни режими в нелинейни вериги. За целта трябва да се използват подходящи итерационни процедури, например последователното приближение или методът на Нютон. За подобряване на сходимостта на изчисленията се препоръчва началното приближение за всяка стъпка да се прогнозира, изчислявайки го със съответния явен метод на числено интегриране. Ако за прогноза и корекция се използват формули от един и същи порядък, може да се оцени грешката от прекъсване като горна стойност за всяка стъпка във времето. Това позволява да се направят изводи за изменение на стъпката T .

При изследване на преходни процеси под влияние на периодични входни сигнали с период $2\pi/\omega$ стъпката не трябва да превишава стойността

$$T_{\max} \leq \frac{2\pi}{\omega q},$$

където например $q > 25$. От друга страна значителното увеличаване на T може да доведе до излишно голям брой итерации. Затова е целесъобразно предварително да се зададе максималният брой итерации N_{\max} за всяка стъпка и при надвишаване на това число следва по подходящ начин да се намали стъпката T . В този случай може да се прилага и оценка на грешките от прекъсване, които зависят от порядъка на метода на интегриране. Ако стойността на T стане под определен минимум, следва да се премине към метод от по-висок порядък.

С. Пример

Разглежда се включване на реален ТТ за средно напрежение с номинално преводно отношение 75/5 А и номинален товар $Z_{\text{ном}} = 1,2\Omega$ към идеален източник на ток от вида

$$i_{\text{зао}}(t) = i_{1m} [\sin(\omega t + \alpha) - e^{-t/T_1} \sin \alpha].$$

Първичен ток с апериодична съставка е получен от физически модел на електропровод за ВН в катедра "Електроенергетика". Включването към мрежата 220V, 50Hz се осъществява посредством тиристорен ключ, с помощта на който се задава ъгълът α . Вторичният товар на трансформатора ($R_T = 7,5\Omega$ и $R_T = 30\Omega$) е направен значително по-голям от номиналния. По този начин се достига режим на насищане при първични токове, каквито може да даде моделът на електропровод (до $100A_{\text{eff}}$).

Входни данни са: $i_{1m} = \sqrt{2} \cdot 40\text{A}$; $\omega = 314\text{s}^{-1}$; $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi/2$; $T_1 = 0,022\text{s}$; $R_2 = 0,0962\Omega$; $w_1 = 4$; $w_2 = 60$. Магнитопроводът със сечение $S_M = 1,323 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$ и дължина на средната магнитна линия $l = 0,36\text{m}$ е изпълнен от феромагнитен материал тип ARMCО М6Т35. Използват се данни за зависимостта $\mu_d(H)$, получени чрез числено диференциране на основната крива на намагнитване $B(H)$ на посочения материал. Формата на магнитопровода е тороидална, навивките са разположени равномерно, така че може да се пренебрегнат потоците на разсейване и $L_{p2} \approx 0$.

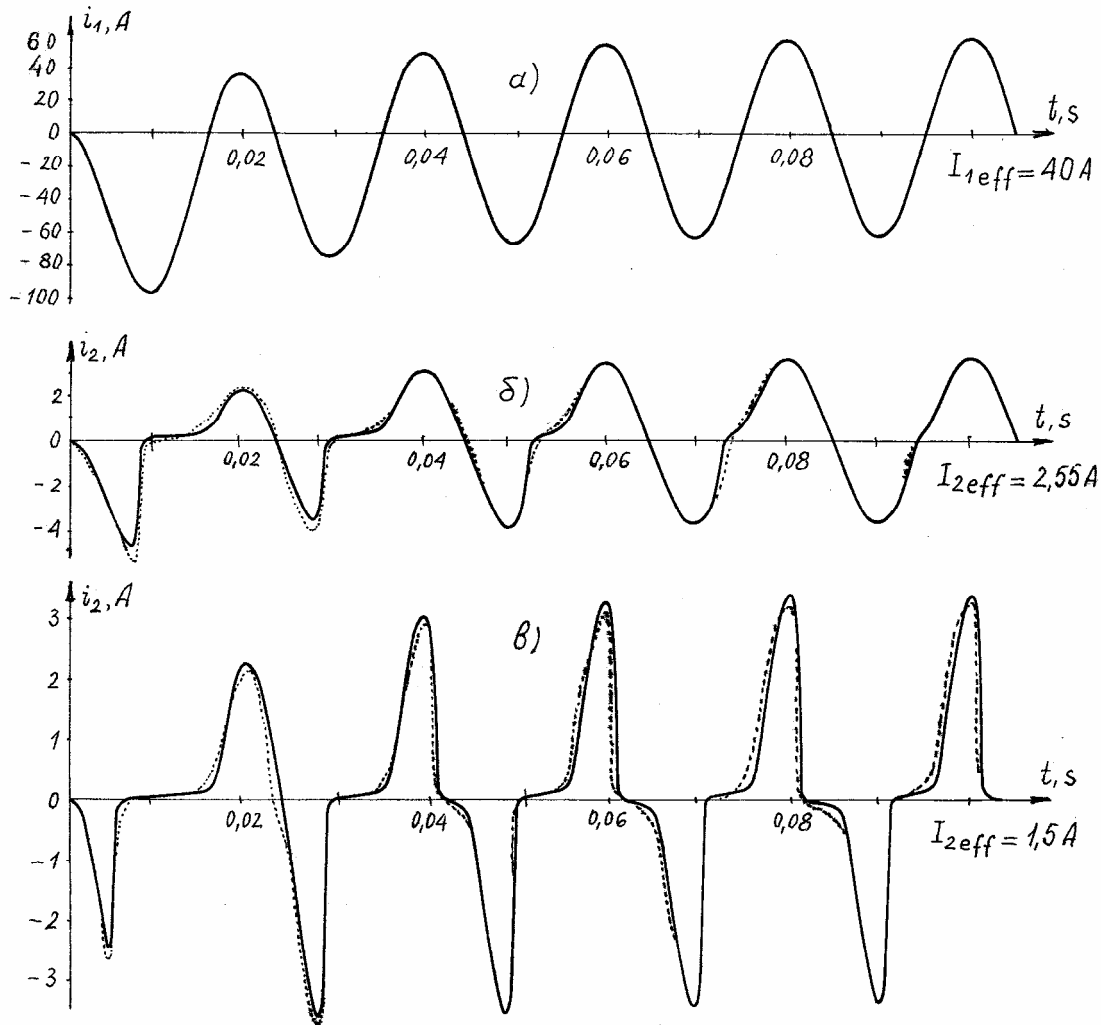
За първите три стъпки за прогноза се използва методът на Ойлер, а за корекция - методът на трапеците. За останалите стъпки прогнозата се прави по формулата

$$x_{n+1}^{(0)} = x_{n-2} + \frac{3}{2} T [f(x_n, t_n) + f(x_{n-1}, t_{n-1})],$$

а корекцията - по метода на трапеците, с използване на метода на Нютон.

На фиг. 2.3.1.7 са дадени графиките на първичния и вторичния ток, получени експериментално и с помощта на изчисление. Графиките на фиг. 2.3.1.7б се отнасят за случая $R_T = 7,5\Omega$ и $\alpha = \pi/2$, а фиг. 2.4.7в - за $R_T = 30\Omega$ и същия ъгъл $\alpha = \pi/2$. Непрекъснатата линия показва резултатите от експеримента, а пунктираната - от изчисленията.

Задоволителното съвпадане на теоретичните и експерименталните данни показва, че в този случай не е необходимо да се отчита намагнитването по частни хистерезисни цикли.



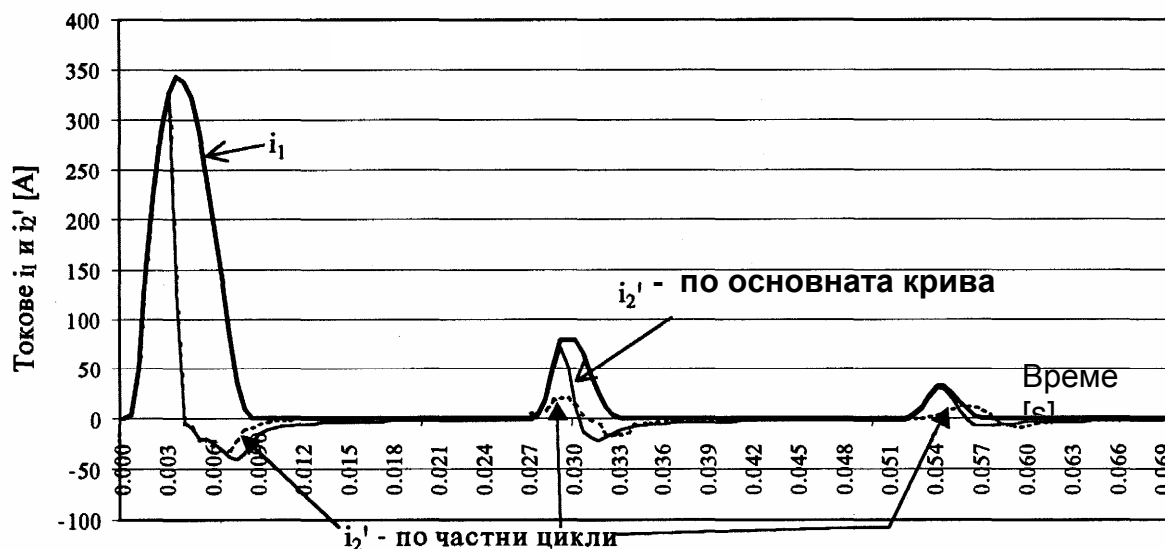
Фиг. 2.3.1.7.

2.3.2. Моделиране при наличие на висши хармоници

Представен е алгоритъм за намиране в установен режим на изходния сигнал на на-ситен ТТ при несинусоидален първичен сигнал и отчитане на деформациите, причинени от нелинейността на магнитопровода. Характеристиката $B(H)$ се апроксимира с полином, входното въздействие се представя като сума от хармоници, задава се експертно приблизителен брой на хармониците, които ще участват в изчисленията, записват се очаквани изрази като функция на времето за магнитната индукция и вторичния ток, като се знае товарът на ТТ се пресмятат за всички хармоници очаквани стойности за коефициентите пред \sin и \cos . Решението се повтаря до постигане на желана точност.

2.3.3. Моделиране с частни хистерезисни цикли по правилата на Маделунг

По правилата на Маделунг са създадени алгоритми и програми за намиране на характеристика “вход-изход” на ТТ. Като специфичен входен сигнал е използван преходен ток на включване на трансформатор. Направено е сравнение на разликата в процеса на намагнитване при използване на основната крива и на частните хистерезисни цикли (фиг. 2.3.3.5) и се анализира работата на диференциална защита на трансформатор.



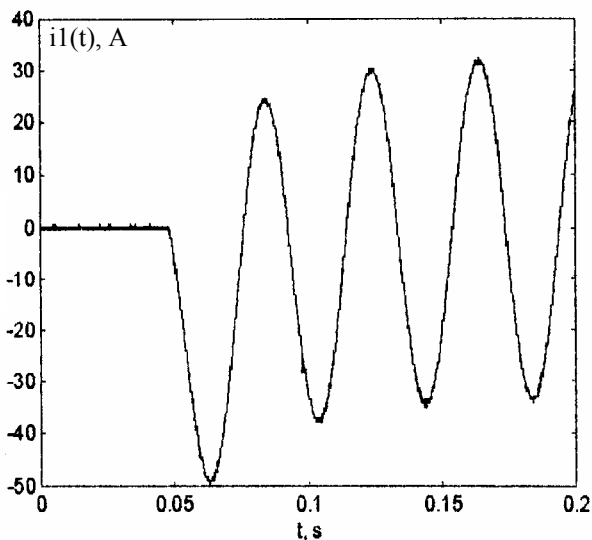
Фиг. 2.3.3.5

2.4. Числено определяне на преходния първичен ток на токови трансформатори при късо съединение

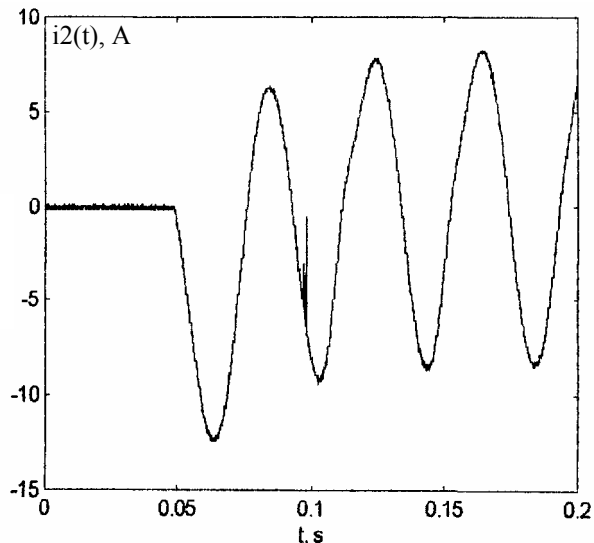
Предлага се по изчислителен път да се възпроизведе преходният първичен ток на к.с., когато са известни параметрите на ТТ, вторичният му товар и вторичният му ток, записан като масив от моментни стойности за няколко периода преди к.с. и за времетраенето на к.с. Такива условия съществуват при съвременните цифрови измервателни устройства, при цифровите регистратори на к.с. и цифровите релейни защиты.

Точната големина и форма на преходния първичен ток не може да се получи от вторичния ток и коефициента на трансформация даже и при линейни феромагнитни ТТ. Намесват се затихващи компоненти на тока, дефинирани от времеконстантата на товара и на вторична верига на трансформатора. Насищането допълнително деформира явлението, а при обектите с високо и свръхвисоко напрежение се проявяват вълновите процеси. Това оправдава създаването на една допълнителна процедура за възстановяване на първичния ток за случаите, когато се налага по-голяма точност на измерване, без да бъде определяща продължителността на изчисленията. Типичен случай е пресмятането на разстоянието до мястото на повредата на електропроводите.

В разглеждания случай ТТ е моделиран по Jiles-Atherton. За потвърждаване на адекватно-

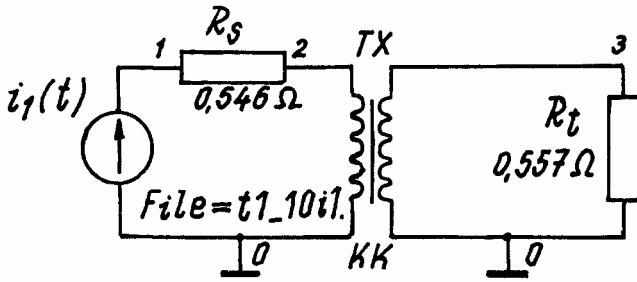


Фиг. 2.4.3.1. Измерен първичен ток



Фиг. 2.4.3.2. Измерен вторичен ток

стта на математическия модел са проведени изпитания в лабораторията “Релейна защита” на ТУ - София. Данните за първичния и вторичния ток се виждат от фиг. 2.4.3.1 и 2.4.3.2.



Фиг. 2.4.4.1. Еквивалентна схема на изследваната верига.

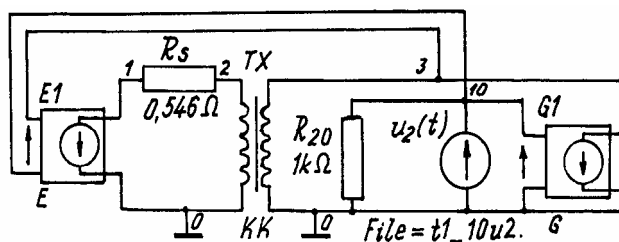
$$(2.4.4.1) \quad \begin{aligned} u_{nul}(t) &= i_{nul}(t) = 0, \\ u_{nor}(t), i_{nor}(t) & - \text{произволни} \end{aligned}$$

Съществуват редица методи за анализ на вериги с нулори. Тези методи, обаче, са специализирани и не могат да бъдат използвани с традиционните програми за симулация на електрически вериги като PSpice. В този случай най-удобно е моделирането на нулор с помощта на източник на напрежение, управляван по напрежение с много голям коефициент на предаване A (фиг. 2.4.4.2). Ролята на резистора R_2 е да предотврати получаването на възел, в който участват по-малко от два клона, което е недопустимо в PSpice. В работата този резистор е поставен между възлите 3 и 10. Използваната в случая схема подобрява точността, тъй като токът между възлите 3 и 10 е равен на нула. За коефициента на предаване на източника на напрежение, управляван по напрежение е избрана стойност $A = 10^{10}$.

Източникът на напрежение u_2 е описан чрез по части линейна функция, която отговаря на записания изходен сигнал. Името на файла е означено на фигурата. Честотата на дискретизация е 20kHz. Вторичният ток i_2 е представен чрез източник на ток, управляван по напрежение, т.е.

$$i_2 = u_2 / R_t.$$

При симулацията на съставената верига от фиг. 2.4.4.2 се получава търсеният входен ток



Фиг. 2.4.4.2. Модел на ТТ в Pspice

$i_1(t)$. Той се отличава незначително от записания входен ток. При изобразяване върху една координатна система двата тока визуално съвпадат с отклонения в максималните стойности, по-малки от 2%.

В дисертацията са описани още правила, по които се приема подходящо за всеки конкретен случай решение. Разпознава се степента на насищане на магнитопровода на ТТ чрез намиране на:

абсолютния максимум на моментните стойности; максимална стойност на магнитната индукция B_{\max} ; обща продължителност на записа; продължителност на повредата; ефективни стойности, средни стойности; основен, втори и други хармоници; коефициенти на формата, деформацията и амплитудата; нулеви стойности в рамките на един период.

Предлага се решение по структурата на експертните системи и четири варианта на оценка на насищането: а) линеен ТТ; б) нелинеен ТТ, който работи в областта на насищането, но се достига до индукции, които допускат изчисление по основната крива на намагнитване; в) нелинеен ТТ, когато се налага обхождане на частни хистерезисни цикли, например ток на празен ход на силов трансформатор, значителна апериодична компонента на тока, остатъчна индукция и т.н.; г) ТТ, работещ дълбоко в областта на насищането.

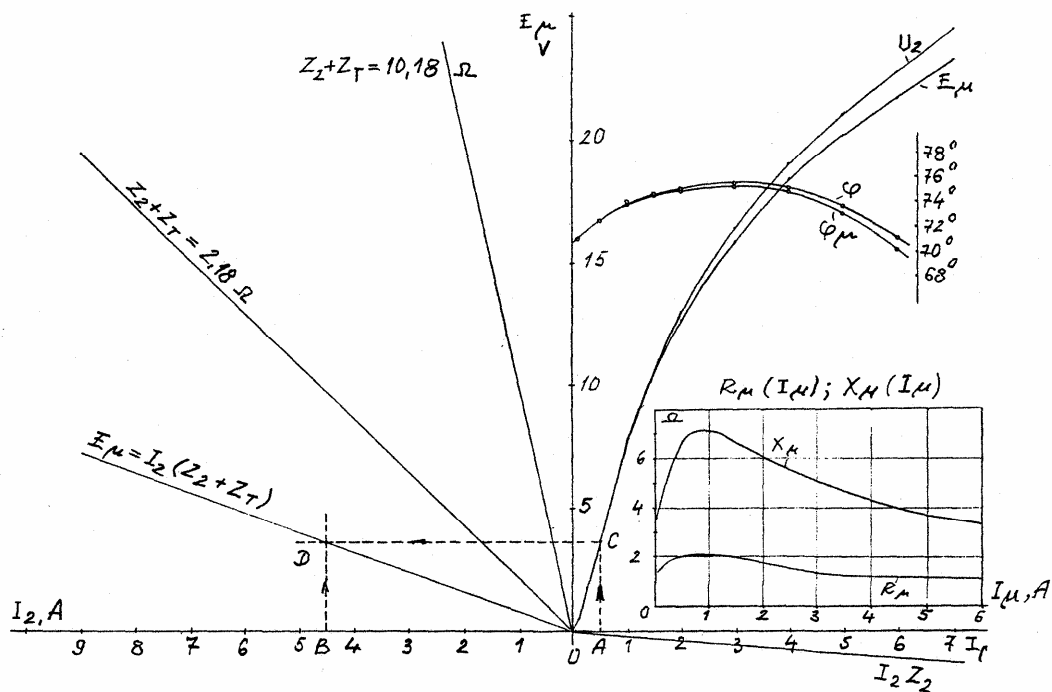
Програмата може да се обогатява с нови логически условия при разкриване на нови свойства на входните сигнали. Пример в това отношение е въвеждането на нови понятия като “честота на тока” и “честота на напрежението”, чрез които може в блока за обработка на входните данни да се добави процедура за по-точно намиране на прехода от нормално в аварийно състояние и да се оцени наличието на аperiodична компонента.

3. Глава трета. Токови трансформатори тип Феранти като източник на входен ток за земни защиты

3.1. Параметри и характеристики на токови трансформатори тип Феранти, определени в условията на експлоатация

Параметрите на токовете трансформатори тип Феранти (ТТФ) се определят като се отчита факта, че работят съвместно със земните защиты в електрическите мрежи средно напрежение. Възможните режими на работа на тези трансформатори са:

a) работа при з.с. в компенсирани мрежи или мрежи с изолирана неутрала, когато трайните



Фиг. 3.1.1.3. Параметри и характеристика “напрежение-ток” за ТТФ

първични токове са от няколко ампера до няколко десетки ампера; b) работа при з.с. в мрежи с неутрала, заземена през неголямо активно съпротивление и траен земен ток от 100А до 500А, като се отчете сумата на активната и капацитивната съставки; c) работа при двуфазно или трифазно к.с. без земя с токове от порядъка на няколко хиляди ампера и условия за максимален небалансиран ток; d) работа при двойно земно съединение (едното з.с. преди, а другото - след ТТФ), когато първичният ток е само един, но с големина на ток на к.с. Индуктивността на разсейване на вторичната намотка на ТТФ се определя както при ТТ. По същия начин се използва характеристиката “напрежение ток”, снета с цифрови апарати (фиг.3.1.1.3).

3.1.1. Небалансиран ток на ТТФ

Небалансираният ток $I_{нб}$ на ТТФ е определен експериментално, като в прозореца на ТТФ с нареден ядрен магнитопровод се прокарва двукратно проводник, имитиращ двуфазно к.с. по кабелна линия. Най-неблагоприятно разположение на фазните кабели, което създава максимален небалансиран ток, е от двете страни на една от двете половини на вторичната намотка. Експериментите показват, че връзката между небалансирания и първичния ток е практически линейна, а това дава възможност да се приеме, че взаимната индукция M между кабела и вторичната намотка е константа, т.е.

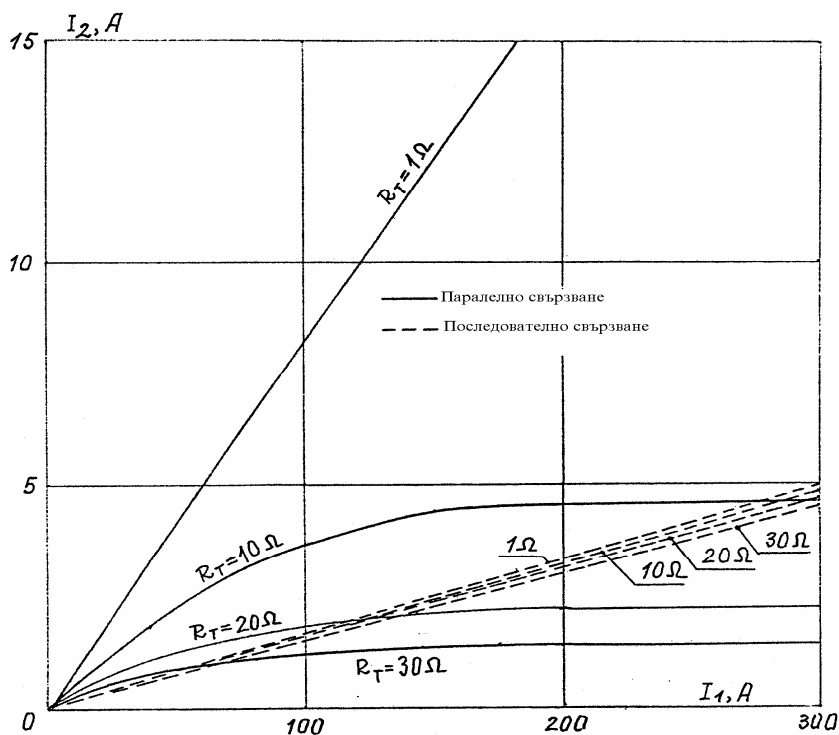
$$(3.1.1.2) \quad I_{нб} = \frac{2\pi f M I_{кс}}{Z_2 + Z_T}$$

Изпитани са три ТТФ с ядрени наредени магнитопроводи (два на ТЕХЕНЕРГО - София и един - тип СЗТТ - Русия) при товари 3, 10, 20 и 30Ω и първичен ток до 2000А. За взаимния импеданс $Z_M = 2\pi f M$ на трите ТТФ са получени стойности със значително различие (съответно 0.187mΩ, 0.606mΩ и 0.530mΩ). За тороидалните ТТФ при същите условия стойностите на взаимната индуктивност, респективно небалансираният ток са няколко пъти по-ниски.

3.1.2. ТТФ при паралелни кабели

При паралелно свързване на няколко силови кабела токовете с нулева последователност се измерват, като на всеки от тях се монтира ТТФ. Вторичните намотки на тези трансформатори има възможност да се включат паралелно или последователно. На фиг.3.1.1.4 са показани експериментални резултати от изпитване на пет еднотипни ТТФ на ТЕХЕНЕРГО - София при двата вида свързване. Характеристиката е "вход-изход" $I_2(I_1)$ при еднакъв първичен ток до 300А и активен товар 1, 10, 20 и 30Ω.

Изборът на схемата на свързване трябва да се подчини на големината на конкретния товар Z_T и големината на очаквания първичен ток I_1 .



Резултатите от фиг. 3.1.1.4 потвърждават теоретическата постановка, че ако ТТФ се разглежда като източник на ток (при по-малки вторични товари и работа в ненаситената област) коректно е паралелното свързване.

Експериментално се установява, че при грешно свързване на началото и края на вторичната намотка на един от участващите в обща схема ТТФ (пет броя) се получава рязко изменение на условията на всеки отделен трансформатор. Сумарните вторични величини, обаче, се изменят по-слабо и при общо голямото разсейване в параметрите на този вид ТТ различията могат да не бъдат забелязани, дори и при

Фиг. 3.1.1.4. Характеристики "вход-изход" на ТТФ при паралелно и последователно свързване на вторичните намотки

първично настройване на релетата. Необходимо е да се следят и величините на всеки отделен ТТФ.

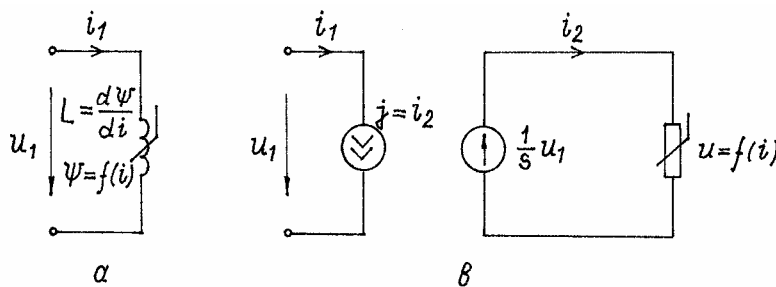
3.2. Моделиране на ТТФ

3.2.1. Моделиране на ТТФ с Т-модел

Създадени са програми в Matlab за пресмятане на характеристиката “вход-изход” на линейни и нелинейни ТТ. Адекватността на математическите модели е доказана чрез сравняване с резултати от експеримент. Освен за директно решаване на задачи тези програми могат да се използват и за намиране на границата, до която може да се изчислява с линеен модел, както и да се съставят двойки от входни и изходни сигнали, удобни за обучаване на невронни мрежи (т. 3.2.4).

3.2.2. Работа с модела Jiles-Atherton

Намагнитващият клон се моделира с последователно свързани бобина L_m и резистор R_m . Те са нелинейни и за стационарни режими, които са близки до синусоидални, могат да се разглеждат като нелинейни само относно ефективната стойност на тока. Те могат да бъдат измерени в лабораторни условия или по време на експлоатация и да се апроксимират с полиноми. Нелинейният резистор R_m е представен в



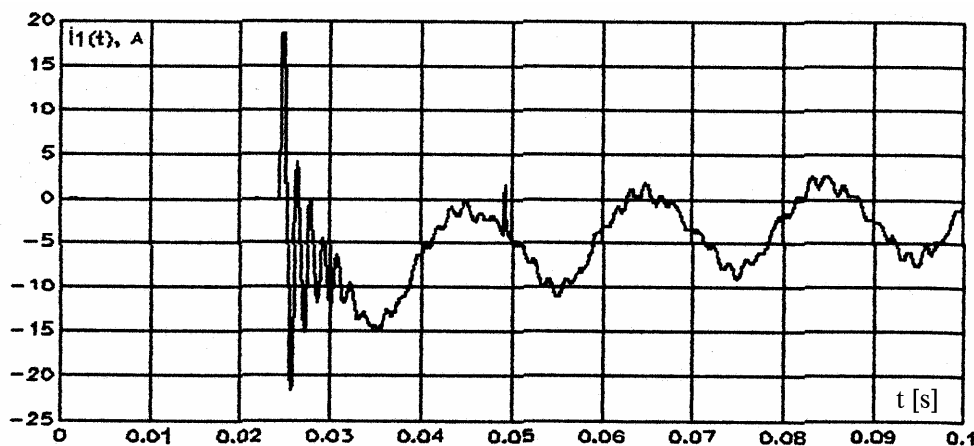
Фиг. 3.2.2.1.

модела като управляван по ток източник на напрежение с характеристика $u=f(i)$ (фиг. 3.2.2.1b). Нелинейната бобина L_m с характеристика $\Psi=f(i)$ (фиг. 3.2.2.1a) се замества с нелинеен резистор с характеристика от вида $u=f(i)$. Функ-

цията f може да се приложи и по отношение на двойката (Ψ, i) , и по отношение на двойката (u, i) . Такова представяне е много удобно, защото прави възможно използването само на един тип нелинейни елементи – нелинейни резистори.

Коректността на модела е проверена чрез сравняване на резултатите от симулацията с експериментално получени данни. За илюстрация се използва реален входен сигнал (фиг. 3.2.2.2).

Описаният модел е по-сложен от Т-модела. Той съдържа много неизвестни параметри, които



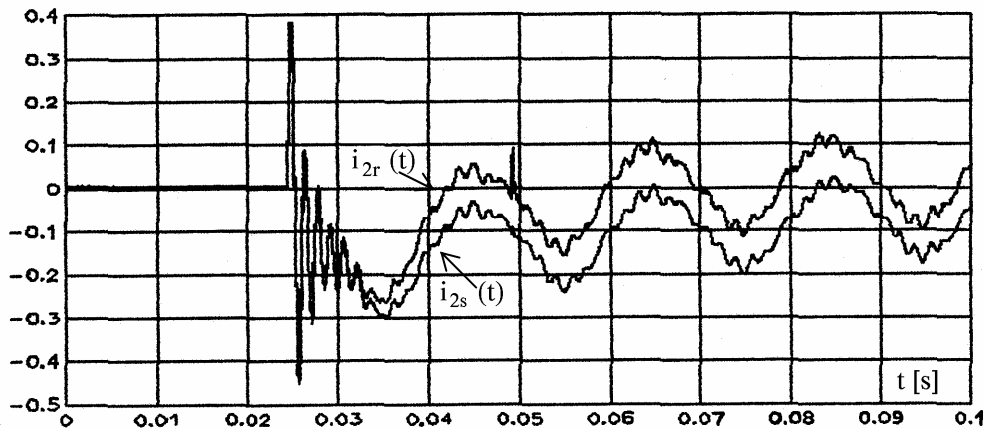
Фиг. 3.2.2.2. Входен сигнал $i_1(t)$, получен експериментално

дават възможност за прецизно моделиране на хистерезисната крива. Използван е програмният продукт PSpice. Задават се: броят на навивките на първичната и вторичната намотка на трансформатора (w_1, w_2), активните съпротивления във вторичната страна, индуктивността на разсейване, параметрите на товара, параметрите от модела на Jiles-Atherton (*Area, Path, Gap*).

Хистерезисни цикли за използвания материал на магнитопровода са взети от каталог на фирмата-производител.

На фиг. 3.2.2.4 са показани експерименталният изходен сигнал $i_{2r}(t)$ и симулираният изходен сигнал $i_{2s}(t)$ при входен сигнал от фиг. 3.2.2.2.

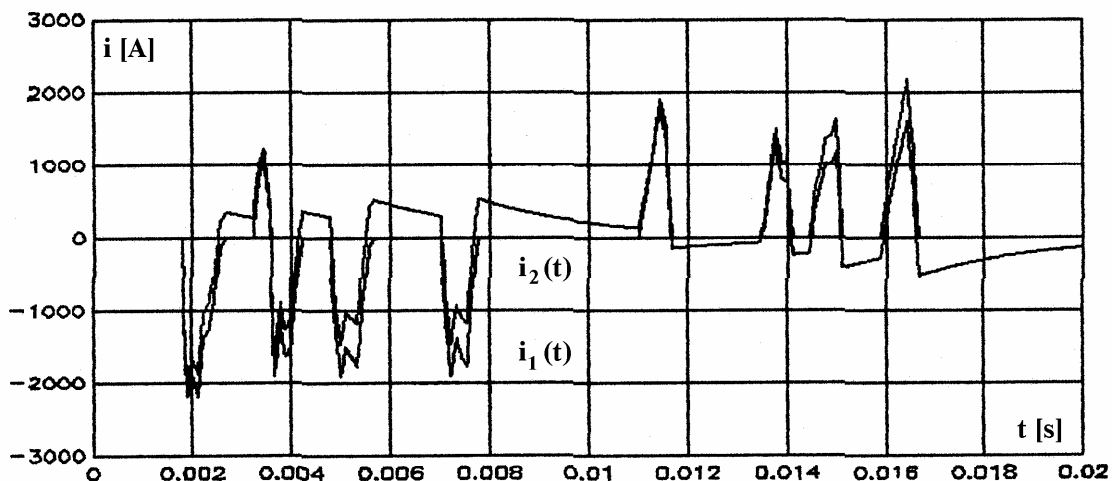
Създадената програма е използвана за изследване на реакцията на ТТФ при разнообразни входни сигнали:



Фиг. 3.2.2.4. Изходен ток: експериментален $i_{2r}(t)$; симулиран $i_{2s}(t)$

А. Входен сигнал, съдържащ периодични и експоненциални компоненти. Токът се предава много добре през трансформатора. Не се генерират висши хармоници.

В. Реакция при входен сигнал с типични висши хармоници. Предаването на висши-те хармоници зависи повече от характера на товара, отколкото от неговата големина. Както се очаква, при активен товар вторичният сигнал има същите хармоници както първичния за широки граници на изменение на съпротивлението на товара. Реактивната компонента на товара има голямо влияние. Първият хармоник е силно намален при малък товар, а при по-голям товар намаляват висшите хармоници.



С. Реакция при сигнал с голяма апериодична компонента. Отнася се за мрежа, заземена през гасителен реактор и точна компенсация. Входният ток на ТТФ съдържа голяма апериодична компонента, пренебрежим основен хармоник и значителен 5-ти хармоник (т. 10.1.3.D). ТТФ деформира сигнала, защото апериодичната съставка се пренася силно намалена. Налице е съществено различие в апериодичната компонента на първичния и вторичния ток. Невъзможно е да се направи правилен извод за загасването на електрическата дъга при първото преминаване на тока през нулата, защото няма съответствие между първичния и вторичния ток по отношение на преминаването през нулата.

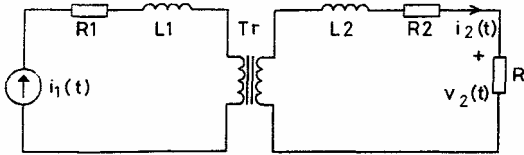
Д. Реакция на сигнал от прекъсваща дъга. В този случай входният сигнал е с широка честотна лента и много сложна форма и в някои случаи има характеристиките на хаотичен сигнал. Както се вижда от фиг. 3.2.2.8 изходният сигнал е деформиран. Това съответства на сложно изменение на магнитната индукция.

3.2.3. Цифрово линейризиране на ТТФ

Задачата тук е същата, както и в т. 2.4 за ТТ: да се намерят точните моментни стойности на първичния ток при известен вторичен ток и параметри на ТТФ. Използван е моделът на Jiles-Atherton.

Решението се провежда аналогично на ТТ от т. 2.4. Схема с първичен ток $i_1(t)$ и товар R е показана на фиг. 3.2.3.1. Означенията са в съответствие с графичните изображения в PSpice.

Проблемът се свежда до задача от анализ на веригата от фиг. 3.2.3.2, която съдържа нулатори и норатори (нулори). Захранването е зададено с $v_2(t)$ и $i_2(t)$, а режимът на изхода се определя от норатор.



Фиг. 3.2.3.1.

За нулатора и норатора важат зависимостите 2.4.4.1. Тук са валидни уравненията:

$$(3.2.3.1) \quad i_{R_2}(t) = i_2(t) + i_{nul}(t) = i_2(t),$$

$$(3.2.3.2) \quad v(t) = v_2(t) + v_{nul}(t) = v_2(t).$$

Както при ТТ и тук е необходимо да се постави норатор на входа, който да направи задачата за анализ коректна. Удобно е нораторът да се замени с източник на напрежение $v_c A$, управляван по напрежение с много голям коефициент на предаване A , например $A = 10^{10}$ (фиг. 3.2.3.3). Нулатор с паралелен пасивен елемент е еквивалентен на нулатор, следователно е възможно да се добави резистор R_n с произволна стойност и да се избегне получаването на “плуващ” възел.

Записаният изходен сигнал u_2 може да се моделира с по части линейна функция. По-добре е по този начин да се моделира само един от необходимите източници, например $i_2(t)$, а за напрежението u_2 да се използва източник на напрежение, управляван по ток $u_2 = R \cdot i_2$. Възможно е задачата да се реши в Pspice и при комплексен товар, като се използва управляващ коефициент в s -областта. След симулирането търсеният входен ток е токът през норатора.

За доказване адекватността на модела е използван експеримент, за който източник на първичния ток е физически модел на разпределителна мрежа за средно напрежение. Включването се извършва с тиристорен ключ в зависимост от моментната стойност на захранващото напрежение. Избира се ток с периодична, аperiодична съставки и висши хармоници.

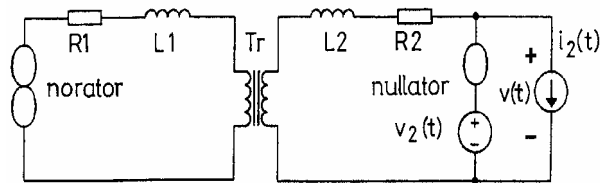
Сравнен със запис от експеримента резултатът от пресмятане дава разлика по-малка от 3% и визуално не се отличава от него (фиг. 3.2.3.4). Не се наблюдават проблеми, свързани със сходимостта на изчислителната процедура.

Сравнен със запис от експеримента резултатът от пресмятане дава разлика по-малка от 3% и визуално не се отличава от него (фиг. 3.2.3.4). Не се наблюдават проблеми, свързани със сходимостта на изчислителната процедура.

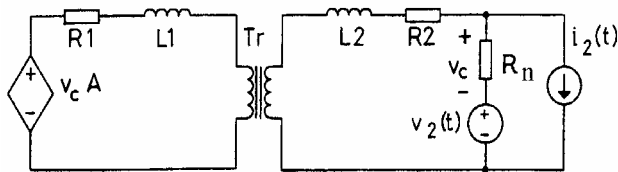
3.2.4. Моделиране на токов трансформатор тип Феранти с помощта на невронни мрежи

А. Система диференциални уравнения

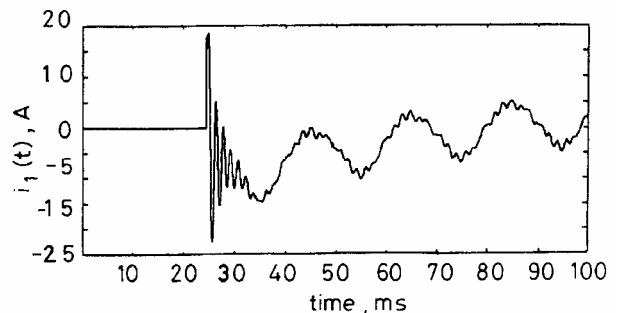
Моделиран е линеен ТТФ с паралелен намагнитващ клон (R_{mp}, L_{mp}). Токът на входа е i_1 , а на изхода i_4 .



Фиг. 3.2.3.2.



Фиг. 3.2.3.3.



Фиг. 3.2.3.4.

Полага се:

$$(3.2.4.7) \quad \begin{aligned} A &= L_L \cdot L_{mp}, \quad B = R_L \cdot L_{mp} + L_L \cdot R_{mp} + R_{mp} \cdot L_{mp}, \\ C &= R_L \cdot R_{mp}, \quad D = L_{mp} \cdot R_{mp} \end{aligned}$$

и функцията $i_4(i_1)$ добива вида:

$$(3.2.4.8) \quad D \frac{di_1(t)}{dt} = A \cdot \frac{d^2 i_4(t)}{dt^2} + B \frac{di_4(t)}{dt} + C \cdot i_4(t).$$

В. Определяне на амплитудно-честотни, фазово-честотни характеристики (АЧХ, ФЧХ) и предавателна функция на ТТФ

За числено определяне на АЧХ и ФЧХ се използва ТТФ, производство на ТЕХЕН-ЕРГО – София: $R_{mp}=25,788\Omega$; $L_{mp}=0,0251\text{H}$; $R_{2s}=0,081\Omega$; $L_{2s}=5,367 \cdot 10^{-4}\text{H}$; $R_{LOAD}=0,5\Omega$; $L_{LOAD}=0\text{H}$.

Предавателната функция при нулеви начални условия добива вида:

$$(3.2.4.11) \quad W(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{A(j\omega)^2 + B(j\omega) + C}.$$

Съставен е модел на ТТФ в пакета Simulink от програмата Matlab. Пресметнати са стойностите на коефициентите: $A=1,3454 \cdot 10^{-5}$; $B=0,6749$; $C=14,9826$; $D=0,6465$.

С. Инициализация и обучение на невронни мрежи с еталони АЧХ и ФЧХ

а) Невронна мрежа за АЧХ и ФЧХ

АЧХ и ФЧХ се приемат за идеални и с тях се обучават невронните мрежи. Инициализирана е нелинейна невронна мрежа на 4 нива. Зададен е входен вектор p , състоящ се от стойности на честотата от 0 до 500Hz. Знае се еталонен изходен вектор T със съответни амплитудни стойности от АЧХ за товар $R_{LOAD}=0,5\Omega$ и фази от ФЧХ за същия товар. За 1200 итерации при обучението е получена за АЧХ средноквадратична грешка $mse=1,559 \cdot 10^{-7}$, а за ФЧХ – $mse=9,16093 \cdot 10^{-8}$. При задаване на честоти извън обхвата на обучаване се стига до грешка 0,3% и при двете характеристики.

б) Изпитване на програмата за установен режим с теоретични сигнали

Едни и същи входни сигнали се подават на създадения модел с невронни мрежи и на програма за линеен ТТФ в Matlab (програма ltt.m). Сравняването на сигналите е по-казано на табл. 3.2.4.1. За точен е приет сигналът от програмата в Matlab.

Табл. 3.2.4.1

№	Входен сигнал	Грешка, %
1	$i_1 = i_{1m} \cos \omega t$	0,2
2	$i_1 = i_{1m} (\cos \omega t - 0,2 \cos 3\omega t)$	0,5
3	$i_1 = i_{1m} (\cos \omega t - 0,2 \cos 3\omega t + 0,1 \cos 7\omega t)$	1,0

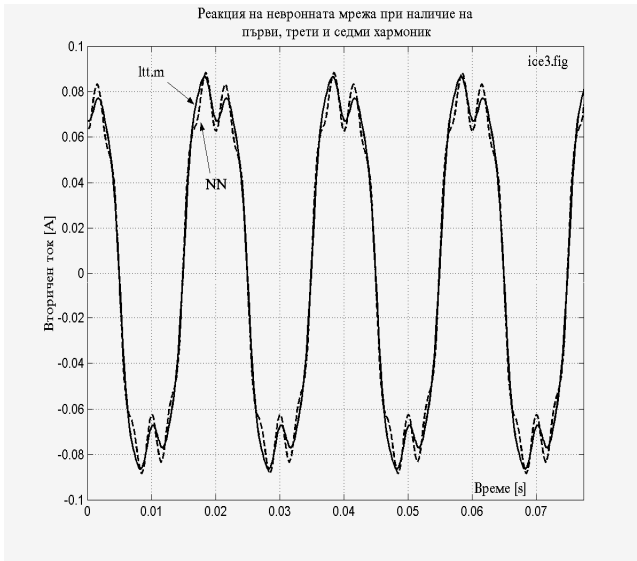
На фиг. 3.2.4.5 е показан третият случай от табл. 3.2.4.1, а на фиг. 3.2.4.6 се виждат, поради увеличението, подробности за формата на вторичния ток.

с) Изпитване на програмата със сигнали за преходен режим

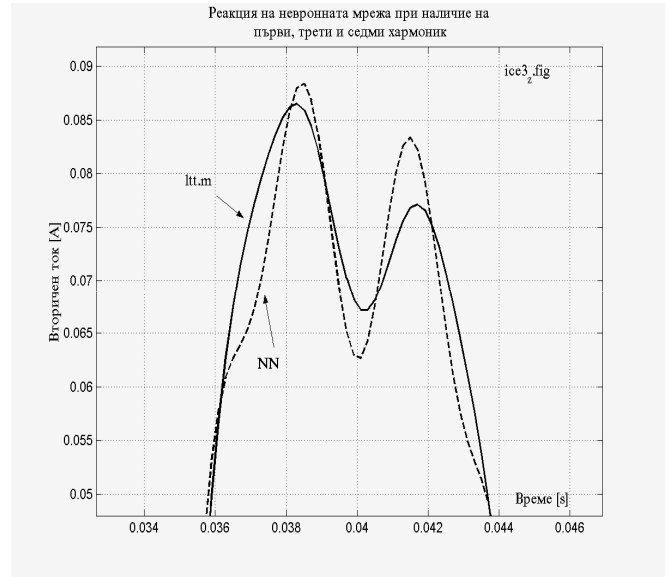
Преходни сигнали, например к.с., се моделират с честотен метод. Първичните сигнали са създадени изкуствено, за да съдържат всички популярни съставки и преходи или са записи за к.с. в реална подстанция (п/я “Панагюрище”).

Вторичните сигнали са от невронната мрежа и за сравнение – от програма, създадена в Simulink на базата на АЧХ и ФЧХ на разглеждания ТТФ (rom.mdl).

На фиг. 3.2.4.7 и 3.2.4.8 са показани резултати при изкуствено създаден първичен сигнал, който започва като синусоида, продължава след плавен преход в затихваща косинусоида и отново, но без плавен преход преминава в синусоида. Покритието на резултатите е много добро, а грешката при най-големите моментни отклонения не надвишава 8%.

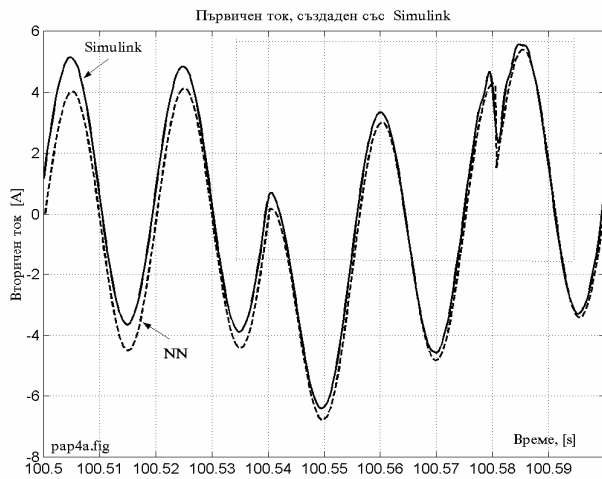


Фиг. 3.2.4.5.

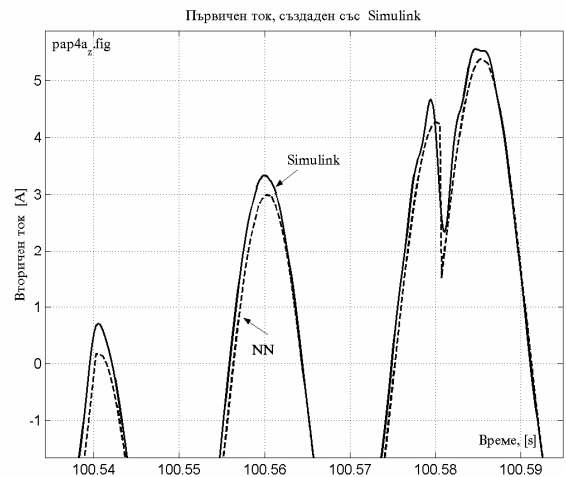


Фиг. 3.2.4.6.

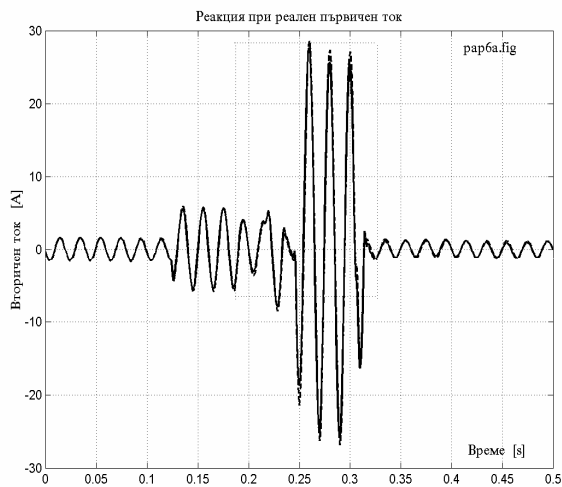
При подаване към невронните мрежи на данни от реални записи в ЕЕС (фиг. 3.2.4.9) се



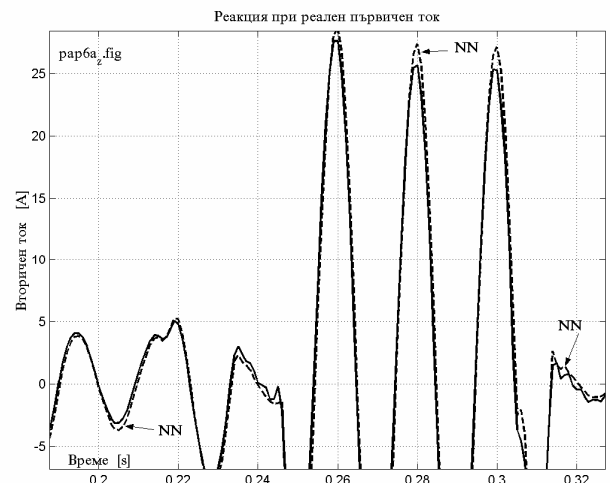
Фиг. 3.2.4.7.



Фиг. 3.2.4.8.



Фиг. 3.2.4.9.



Фиг. 3.2.4.10.

прави предварителен хармоничен анализ. Резултатите имат много добро съвпадение, а най-големите разлики са няколко процента.

Избраният случай се отнася за сложна повреда, която започва с нормален режим, поява на з.с, разрастване на з.с. в междуфазно и изключване на повредения извод от релейната защита. Увеличението на графиката на фиг. 3.2.4.10 също показва, че отклоненията са незначителни.

3.3. Съвместна работа на токови трансформатори тип Феранти с цифрови земни защиты

Проведено е експериментално изследване на токови трансформатори тип Феранти при работа съвместно с цифрови релейни защита (ЦРЗ), които имат минимална консумация в токовите вериги. Снети са характеристиките “вход-изход” и типичните за токовите трансформатори характеристики “напрежение-ток” на 6 броя трансформатори тип ТЗЛМ-1 (Русия). Проведено е изследване и на паралелно и последователно свързани ТТФ при различни товари.

Целта е да се изгради програма за пълна проверка на ТТФ, които трябва да работят съвместно с ЦРЗ. Прилага се като единствено възможен цифров запис и обработка на сигналите. За експериментите се използват пълно възможностите за създаване на разнообразни входни сигнали в лаборатория “Релейна защита” при ТУ – София.

Препоръчва се следната пълна програма за изпитване:

- a) определяне на характеристиките “напрежение-ток”;
- b) определяне на характеристиките “вход-изход” при товари, представляващи интерес за земната защита. Интерес представляват характеристиките при минимални първични токове и малки вторични товари;
- c) работа в установен режим при наличие на висши хармоници в първичния ток;
- d) работа в преходен режим при особеностите на мрежите с изолирана неутрала;
- e) работа в преходен режим при особеностите на компенсираните мрежи;
- f) работа в преходен режим при наличие на апериодични съставки в първичния ток;
- g) работа в преходен режим при първичен ток, представляващ ударен ток на включване на силов трансформатор на празен ход;
- h) определяне на АЧХ и ФЧХ, а чрез тях моделиране с невронни мрежи (т. 3.2.4);
- i) работа на паралелно и последователно свързани ТТФ.

В глава четвърта на дисертацията са посочени някои особености на входните токове, създадени от неконвенционалните преобразователи (главно като необходимост от създаване на линейни модели), а в глава пета са посочени обобщено резултатите и изводите от първата част на разработката.

Част втора. Входни напрежения

6. Глава 6. Деформирани сигнали в индуктивни напрежителни трансформатори

6.1. Деформирани входни напрежителни сигнали при електромери

Изследван е случай, когато в първичната страна на индуктивен напрежителен трансформатор (ИНТ) за 20kV има изгорели предпазители и отчитаната енергия не съответства на реалната. Констатира се дори, че при изгаряне на два предпазителя електромерът се върти в обратната на реалната посока.

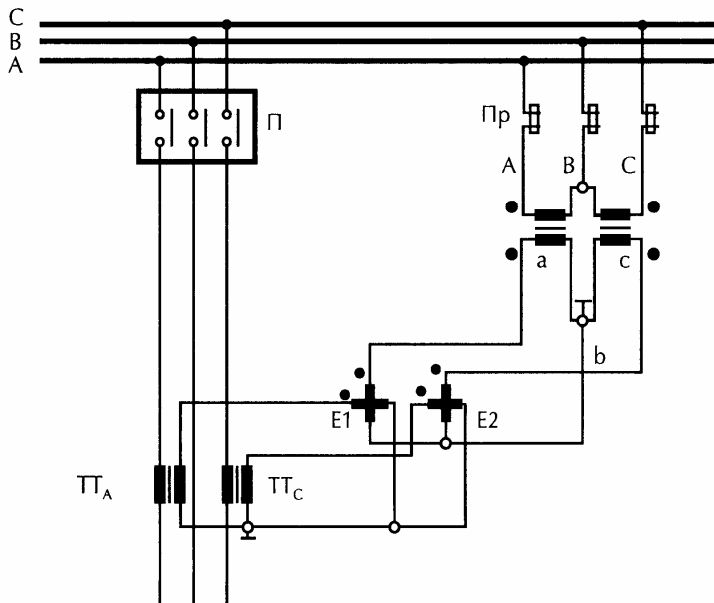
6.1.1. Постановка на задачата

В разглежданите подстанции за отчитане на електроенергията се използва схемата Арон (фиг. 6.1.1.1). Измерваната активна енергия е интегралът на мощността

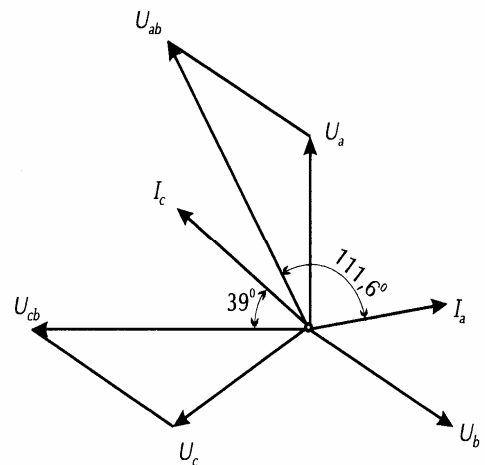
$$(6.1.1.1) \quad P = U_{ab} I_a \cos(\widehat{U_{ab} I_a}) + U_{cb} I_c \cos(\widehat{U_{cb} I_c}).$$

Преводните отношения на измервателните трансформатори се подразбират.

Векторната диаграма (фиг. 6.1.1.2) илюстрира условията за нормална работа на електромера.



Фиг.6.1.1.1. Схема на опитната постановка



Фиг. 6.1.1.2. Векторна диаграма при нормална работа

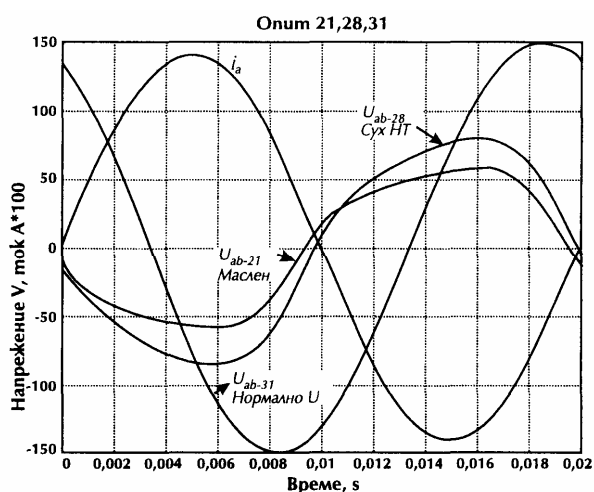
Типична повреда е изгаряне на предпазители в първичните вериги на НТ. За анализирането ѝ са създадени реални условия за измерване и осцилографиране по схемата от фиг. 6.1.1.1 в реална подстанция към промишлено предприятие. Проведени са 33 опита при различни условия: всички комбинации от извадени предпазители (А и В; В и С; С и А); различни товари; за маслени и сухи НТ.

6.1.2. Експериментални резултати

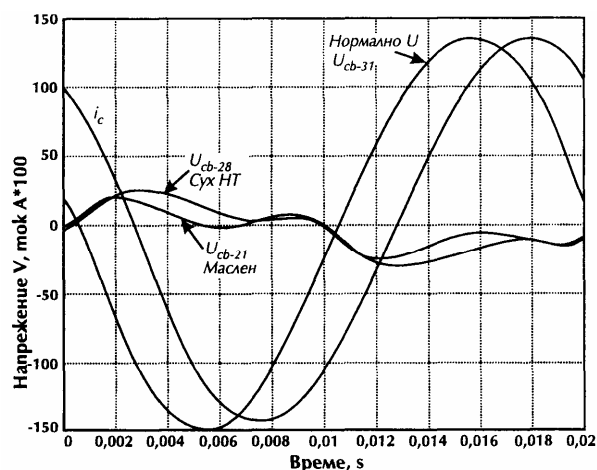
Проведени са експерименти в нормални условия и изправна схема, за да се установи правилната работа на електромерите. Измерване е проведено и при нормална работа на предпаятието, нормална схема на свързване на електромерите и изведени предпазители във фази В и С на високата страна на НТ. Този случай е приет за базов и спрямо него по-долу се правят някои сравнения. Опитът има № 28 и се отнася за сухи НТ. Входните напрежения на електромерите са несинусоидални. Електромерът за активна енергия се върти в обратна посока и измерва 55 s/tur, което съответства на вторична мощност -66,04W (като генератор!). Това въртене в обратна посока и е по-бързо от въртенето в права посока при същите товари и изправна напрежителна система.

По-пълна представа за явлението при аварийен режим дават осцилограмите на вторичните напрежения и токове - фиг. 6.1.2.1 (u_{ab21} и u_{ab28}) и 6.1.2.2 (u_{cb21} и u_{cb28}), на които са показани и нормалният режим (опит №31) и аварийните режими (№28 за сухия НТ и №21 за масления). Напрежението на първия елемент на електромера U_{ab} намалява, деформира се и се завърта почти в противофаза с тока I_a . Ъгълът φ_{U_{ab}, I_a} е бил $111,6^\circ$, а става 196° .

Напрежението на втория елемент U_{cb} намалява и се деформира по-силно, а фазата на ос-



Фиг. 6.1.2.1.



Фиг. 6.1.2.2.

новния хармоник от 39° става 218° .

6.1.3. Анализ на резултатите

А. Роля на реда на липсващите фази

Правени са комбинации от извеждане на предпазители: А и В; В и С; С и А. Трите комбинации дават три различни количествени резултата. Очакването за симетрия спрямо средната фаза не се потвърди.

В. Роля на конструкцията на напрежителните трансформатори

Сравнени са маслен и сух НТ за базовия случай, когато са извадени предпазители на фази В и С. Резултатите се виждат пак от осцилограмите на фиг. 6.1.2.1 (u_{ab21} и u_{ab28}) и фиг. 6.1.2.2 (u_{cb21} и u_{cb28}). Сухият НТ дава 40% по-високо напрежение между фазите А и В и 30% по-високо напрежение между фазите С и В.

С. Големина и хармоничен състав на вторичните напрежения и токове

Проявяват се преимуществено първи, трети и пети хармоник.

Д. Роля на шините между предпазители и напрежителните трансформатори

Алуминиевите шини между предпазители и НТ са свалени за фазите с извадени предпазители. Констатира се, че липсата на шини намалява амплитудата на вторичното напрежение в конкретния случай с около 12% за U_{ab} и 24% за U_{cb} .

Е. Роля на товара във вторичната верига

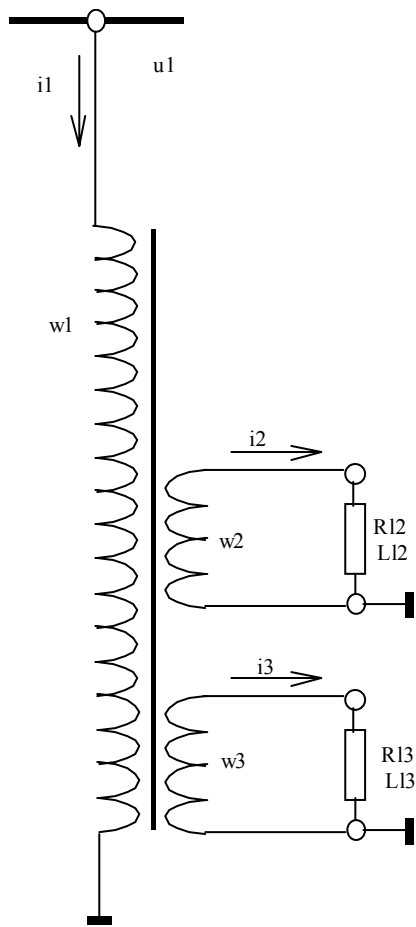
Във вторичната страна на НТ са включени шунтове във всяка фаза (фиг. 6.1.1.1) и са осцилографирани токовете I_{vAB} и I_{vCB} . Потвърждава се очакваният резултат, че при липса на товар във вторичната страна на единия от НТ нарастват напреженията и на двата НТ, особено на ненаварения.

Ф. Роля на големината на товара на обекта

Товарът влияе количествено на показанията на електромерите в зависимост от липсващите фазни напрежения, но качествено констатираните нарушения остават.

Обобщението е, че при изгаряне на предпазители на страна високо напрежение на НТ има прехвърляне на сигнали между намотките на НТ по капацитивен път. Измерен, капацитетът между намотките за високо и ниско напрежение дава стойности от 50 до 250 pF, който е напълно достатъчен за такова прехвърляне. Опитите със сваляне на съединителни шини, смяната на НТ и разтоварването на НТ потвърждават това обобщение.

6.2. Моделиране на индуктивни напрежителни трансформатори при работа с релейни защиты в установен режим



Фиг. 6.2.1.1.

За определяне на параметрите на ИНТ се използва подходът при ТТ. Измерванията се провеждат от вторичната страна: активно съпротивление; характеристика “напрежение-ток” при празен ход; опит на к.с. На базата на опита при празен ход за всяка измерена точка от характеристиката на празен ход $U_{10}(I_{10})$ може да се запише системата уравнения:

$$(6.2.1.1) \quad U_{10} = I_{10} \cdot Z_1 + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{0eff};$$

$$(6.2.1.2) \quad I_{10} \cdot w_1 = Z_{\mu} \cdot \Phi_{0eff};$$

или

$$(6.2.1.3) \quad Z_{\mu} = w_1 \cdot I_{10} / \Phi_{0eff}$$

Също така може да се запише

$$(6.2.1.4) \quad \Phi_{0eff} = (U_{10} - I_{10} \cdot Z_1) / (i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot w_1) = K_{10} \cdot I_{10}$$

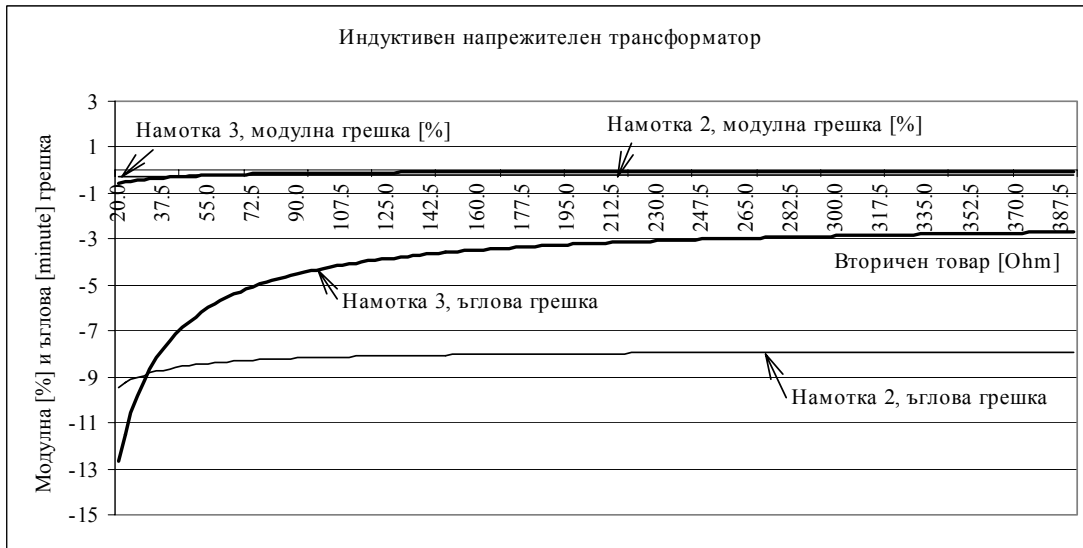
и за всяка измерена точка да се пресметне коефициентът $K_{10} = \Phi_{0eff} / I_{10}$, за да се елиминира като променлива токът I_{10} и да остане потокът Φ_{0eff} , който участва и в следващите уравнения. Коефициентът K_{10} и магнитното съпротивление Z_{μ} са комплексни числа.

В съответствие с означенията на схемата от фиг. 6.2.2.1 се записва:

$$(6.1.2.5) \quad \begin{cases} I_1 w_1 - I_2 w_2 - I_3 w_3 = I_{10} w_1 = Z_{\mu} \dot{\Phi}_{0eff} = \frac{\Phi_{0eff}}{K_{10}} w_1; \\ U_1 = I_1 Z_1 + j 2 \pi f w_1 \dot{\Phi}_{0eff}; \\ 0 = I_2 Z_{2l} + I_2 Z_2 - j 2 \pi f w_2 \dot{\Phi}_{0eff}; \\ 0 = I_3 Z_{3l} + I_3 Z_3 - j 2 \pi f w_3 \dot{\Phi}_{0eff}. \end{cases}$$

На базата на (6.1.2.5) чрез преобразуване е съставена програма в Matlab за изследване на ИНТ в установен режим. Тя дава възможност да се намерят изходните величини и грешките, а

променливите величини могат да бъдат: честота, товари, параметри на намотките, насищане на магнитопровода (коэффициент K_{10}). По метода на еквивалентните синусоиди може да се задават серия стойности за потока $\Phi_{0\text{eff}}$, да се изчислят съответстващите първични напрежения U_1 и да се състави функция на първичното напрежение от потока $U_1(\Phi_{0\text{eff}})$. Така е възможно да се реши нелинейната задача в установен режим за намиране на потока при всяко напрежение, а от там по уравненията от системата (6.1.2.5) и изходните величини.



Фиг. 6.2.2. Зависимост на грешката от товара

На фиг. 6.2.2 са дадени грешките за един ИНТ при промяна на товара под и над номиналната му стойност ($Z_{2L} = Z_{3L} = 33,33\Omega$).

6.3. Моделиране на индуктивен напрежителен измервателен трансформатор в преходен режим

Моделиран е еталонен напрежителен измервателен трансформатор 220/2200V с нареден магнитопровод с три ядра. Двете намотки са поставени на средното ядро. Използват се означенията: $e(t)$ – идеален източник на напрежение; $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – първичен и вторичен ток; w_1 и w_2 – брой първични и вторични навивки; Φ_0 – основен магнитен поток; r_1 и r_2 – активно съпротивление на първичната и вторичната намотки; $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ – индуктивност на разсейване на първичната и вторичната намотки; r_{load} и L_{load} – активно и индуктивно съпротивление на вторичния товар.

Основни уравнения:

$$(6.3.1.1) \quad \begin{aligned} e(t) = u(t) &= r_1 \cdot i_1(t) + \frac{d\Psi_1(t)}{dt} \\ 0 &= (r_2 + r_{load}) \cdot i_2(t) + \frac{d\Psi'_2(t)}{dt}, \end{aligned}$$

където $\Psi'_1(t) = L_{1\sigma} \cdot i_1(t) + \Psi_1(t)$ и $\Psi'_2(t) = (L_{2\sigma} + L_{2load}) \cdot i_2(t) + \Psi_2(t)$. След преобразуване в матричен вид системата има вида:

$$(6.3.1.2) \quad \dot{\Psi} = -\mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{u},$$

където

$\dot{\Psi} = \begin{bmatrix} \dot{\Psi}'_1(t) \\ \dot{\Psi}'_2(t) \end{bmatrix}$ е матрицата стълб с производните на променливите на състоянието;

$R = \begin{bmatrix} -r_1 & 0 \\ 0 & -(r_2 + r_{load}) \end{bmatrix}$ - диагонална матрица на активните съпротивления;

$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix}$ - матрица стълб на токовете;

$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ 0 \end{bmatrix}$ - матрица стълб на захранващото напрежение (смушаващото въздействие).

Връзката между променливите на състоянието и токовете при отчитане на нели-нейната връзка $L(i)$ се изразява чрез:

$$(6.3.1.3) \quad \Psi = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i}.$$

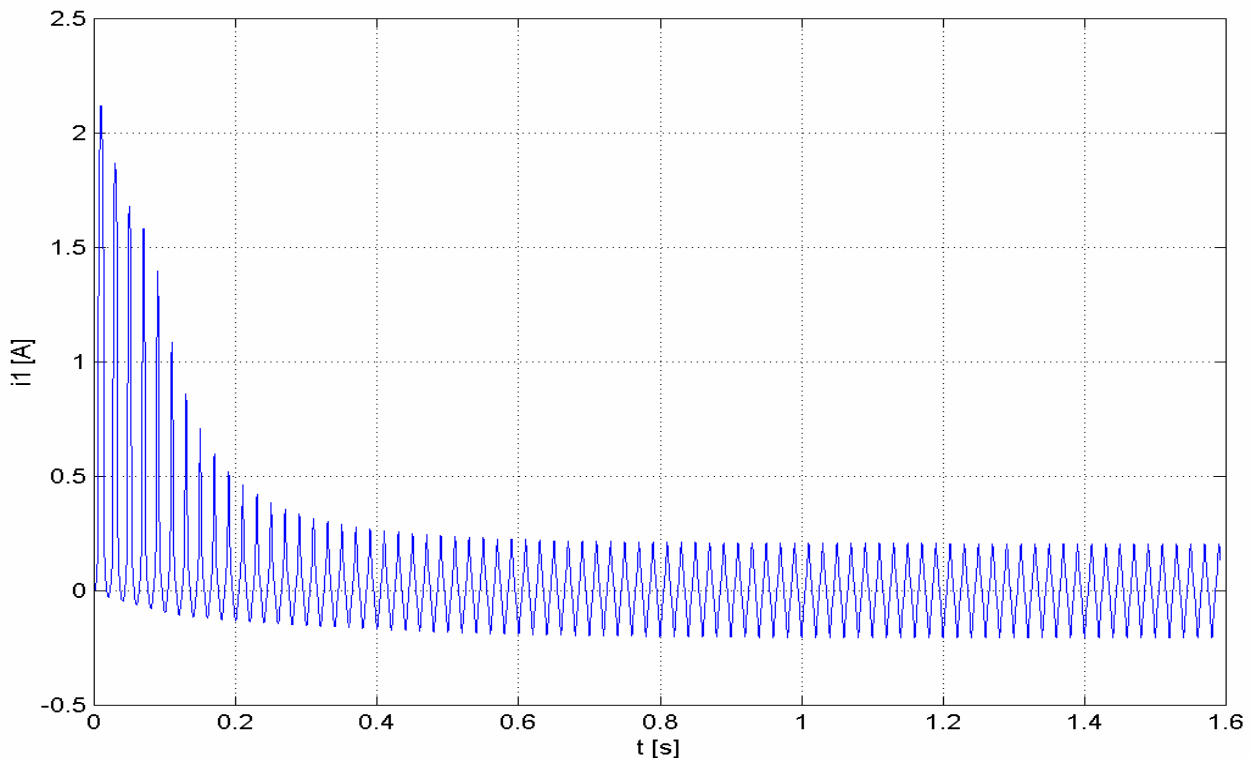
За конкретния пример се записва още $\Phi_1 = \Psi_1 / w_1$; $\Phi_2 = \Psi_2 / w_2$ и $F_1 = w_1 i_1$; $F_2 = w_2 i_2$. Означенията са: F_1 и F_2 - м.д.н. на първичната и вторичната намотки; $G_{\mu e}$ – еквивалентно магнитно съпротивление.

При изследване на собствените стойности и числото на обусловеност на матрицата \mathbf{L} е установено, че в повечето случаи системата е изключително лошо обусловена и задачата – много “твърда”. За преодоляване на този проблем е подходящо използването на системата на относителните единици. Определянето на матрицата \mathbf{L} на всяка стъпка е съществен елемент от изчислителната процедура.

Пример

За моделирания ИНТ се прилага системата на относителните единици при следните базисни величини: $S_6=2000\text{VA}$; $U_{16}=220\text{V}$ и $U_{26}=2200\text{V}$.

Проведена е серия изпитвания на трансформатора в режим на празен ход, за да се определи зависимостта $\mu_{\text{дин}} = f(B)$. Изградена е апроксимация с полином от седма степен до индукция 1,868Т и експонента над тази стойност.



Фиг. 6.3.3.2. Ток на включване – резултати от пресмятане

Трудности се срещат на всяка стъпка от процедурата: апроксимиране, числено интегриране, базисни величини при привеждане и т.н.

Експериментите са провеждани при размагнитване на магнитопровода преди всяко включване. За да се наподобява включване към идеален източник на напрежение, в лабораторията “Релейна защита” е направена специална връзка с подходящо сечение и минимален импеданс към захранващия трансформатор на сградата.

Създадената програма в Matlab съдържа процедура за интегриране по Рунге-Кута `deriv3.m` и `m`-файл с входни данни. Могат да се задават произволно захранващите напрежения, параметрите на трансформатора, товара, импеданса на връзката с ЕЕС и началните условия. Един резултат от изчисление е показан на фиг. 6.3.3.2.

Резултатите от експерименти и изчисления за преходния процес при включване на празен ход имат добро съвпадане за ударната стойност, но съвпадане на процесите на затихване е трудно постижимо.

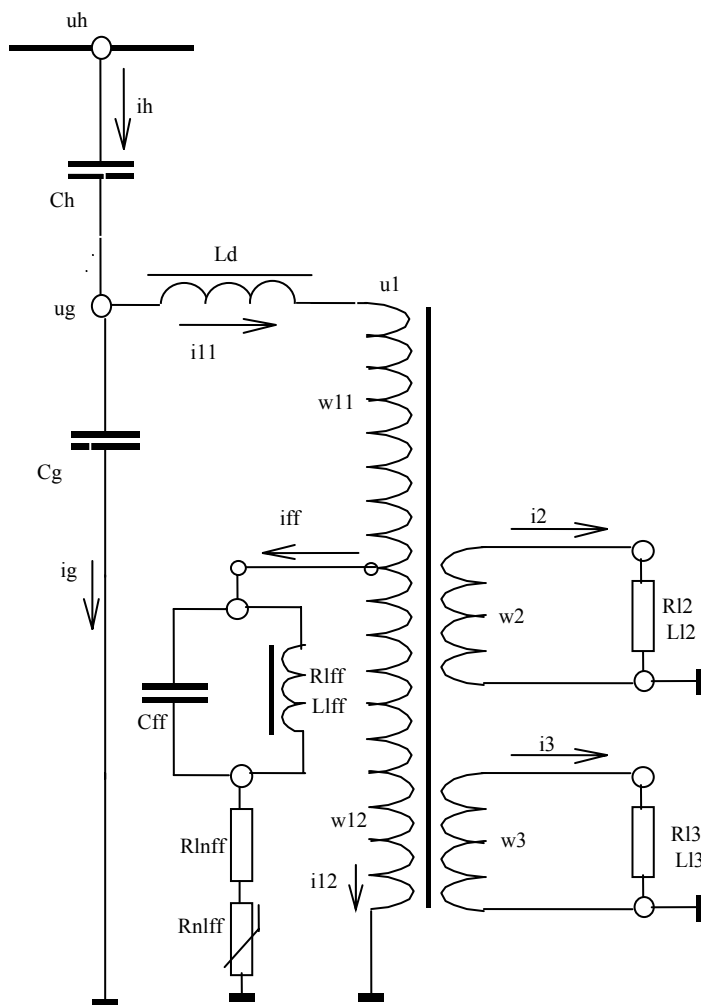
7. Глава седма. Работа на кондензаторни напрежителни трансформатори съвместно с релейни защиты

Кондензаторните напрежителни трансформатори (КНТ) (фиг. 1.1.2.1) имат по-сложна схема от ИНТ, която включва кондензаторен делител, демпфериращ дросел, ИНТ за 20kV и специални мерки против ферорезонансни явления. При избор и въвеждане в експлоатация на КНТ трябва

да се познават редица параметри: големина и характер на товара (релейните защиты), неговата линейност, формата на напрежението с отчитане на аperiодични компоненти, висши хармоници и субхармоници.

7.1. Параметри на КНТ

При КНТ не е възможно както при измервателните трансформатори за ток и напрежение да се определят всички необходими параметри и характеристики в условията на експлоатация. Причината е сложността на схемата и голямото разнообразие от начини за избягване на ферорезонанс. В дисертацията се разчита на наличие на реален КНТ и високоволтова изпитвателна лаборатория (Елпром-Хюндай-София). Изпитания са проведени на трансформатора в работен вид. След това трансформаторът е разглобен на самостоятелни елементи и всеки елемент е подложен на изследване с регистриране на величините с цифров осцилоскоп.



Фиг. 7.1.1.1. Схема на кондензаторен НТ

7.2. Моделиране на капацитивни напрежителни трансформатори в установен режим

Разработени са линейни модели на КНТ, реализирани в Matlab. Входен сигнал е първичното напрежение.

За изследването е използван КНТ тип C2VT 123/8 на италианската фирма Passoni & Villa. Той има схемата, показана на фиг. 1.1.2.1 и данни: $U_h=110\text{kV}$, $C_h=9,89\text{pF}$, $C_g=44\text{pF}$, $U_1=20/\sqrt{3}\text{kV}$ и товар на всяка от вторичните намотки 100VA , т.е. $Z_{2L}=Z_{3L}=33,33\Omega$ при фактор на мощността $0,8$ и точност $0,2\%$.

От опита при късо съединение на ИНТ са определени параметрите Z_{11} , Z_{12} , Z_2 и Z_3 , които включват индуктивността на разсейване на съответните намотки и тяхното активно съпротивление.

На базата на опита при празен ход за всяка измерена точка от характеристиката на празен ход $U_{10}(I_{10})$ може да се запише системата уравнения:

$$(7.2.1) \quad \begin{aligned} \dot{U}_{10} &= \dot{I}_{10} Z_1 + i2\pi f w_1 \dot{\Phi}_{0eff}; \\ \dot{I}_{10} w_1 &= Z_\mu \dot{\Phi}_{0eff} \end{aligned}$$

Както в гл. 6 може да се запише

$$(7.2.2) \quad \dot{\Phi}_{0eff} = \frac{\dot{U}_{10} - \dot{I}_{10} Z_1}{i2\pi f w_1} = \dot{K}_{I0} \dot{I}_{10}$$

и за всяка измерена точка да се пресметне коефициентът

$$(7.2.3) \quad \dot{K}_{I0} = \frac{\dot{\Phi}_{0eff}}{\dot{I}_{10}}.$$

Разглежда се работата на КНТ само в линейната област и затова се приема за ко-ефициента \dot{K}_{I0} постоянна стойност.

В съответствие с означенията на схемата от фиг. 1.1.2.1 се записва:

$$(7.2.4) \quad \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_2 w_2 - \dot{I}_3 w_3 = \dot{I}_0 w_1 = Z_\mu \dot{\Phi}_{0eff};$$

$$(7.2.5) \quad \dot{U}_1 = \dot{I}_{11} Z_{11} + j2\pi f w_{11} \dot{\Phi}_{0eff} + \dot{I}_{12} Z_{12} + j2\pi f w_{12} \dot{\Phi}_{0eff};$$

$$(7.2.6) \quad 0 = \dot{I}_2 Z_{2l} + \dot{I}_2 Z_2 - j2\pi f w_2 \dot{\Phi}_{0eff};$$

$$(7.2.7) \quad 0 = \dot{I}_3 Z_{3l} + \dot{I}_3 Z_3 - j2\pi f w_3 \dot{\Phi}_{0eff};$$

$$(7.2.8) \quad 0 = \dot{I}_{12} Z_{12l} + j2\pi f w_2 \dot{\Phi}_{0eff} - \dot{I}_{ff} Z_{ff};$$

$$(7.2.9) \quad \dot{I}_{11} = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{ff};$$

$$(7.2.10) \quad w_{11} = w_{11} + w_{12};$$

$$(7.2.11) \quad \dot{U}_g = \dot{U}_1 + \dot{I}_{11} Z_d;$$

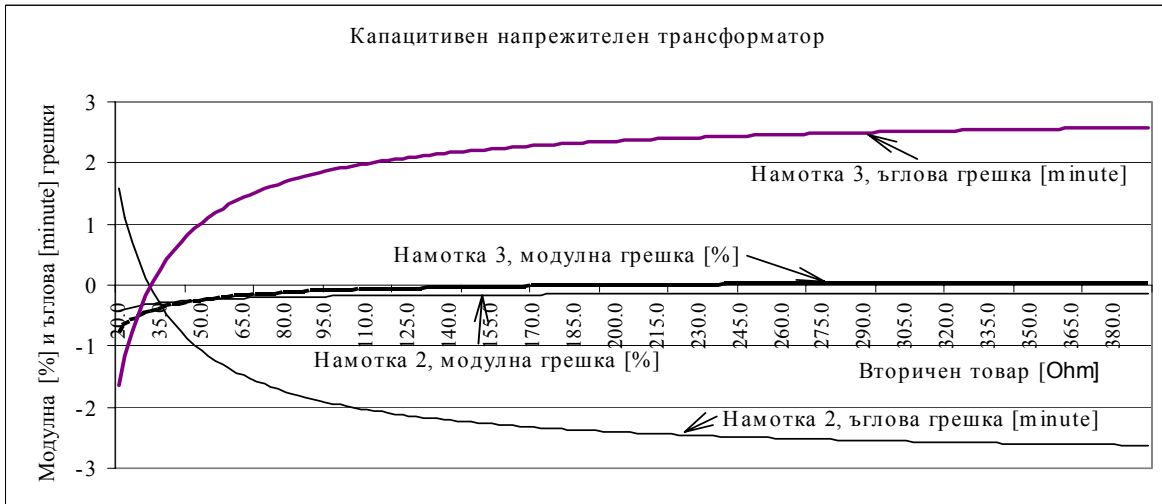
$$(7.2.12) \quad \dot{U}_h = \dot{U}_g + \dot{I}_h Z_{Ch}; \quad Z_{Ch} = \frac{1}{j2\pi f C_h};$$

$$(7.2.13) \quad \dot{U}_g = \dot{U}_g + \dot{I}_g Z_{Cg}; \quad Z_{Cg} = \frac{1}{j2\pi f C_g};$$

$$(7.2.14) \quad \dot{I}_h = \dot{I}_g + \dot{I}_{11};$$

Аналитично се решава системата (7.2.3 - 7.2.14), като магнитният поток $\Phi_{0\text{eff}}$ се изразява чрез коефициента K_{10} . С програмния продукт Matlab са получени желаните числени стойности и характеристики. Като илюстрация на фиг. 7.2.1 се показва зависимостта от товара на модулната и ъгловата грешка на всяка от вторичните намотки. Грешките са най-благоприятни при номиналния товар, който в случая е 100VA или 33,33Ω.

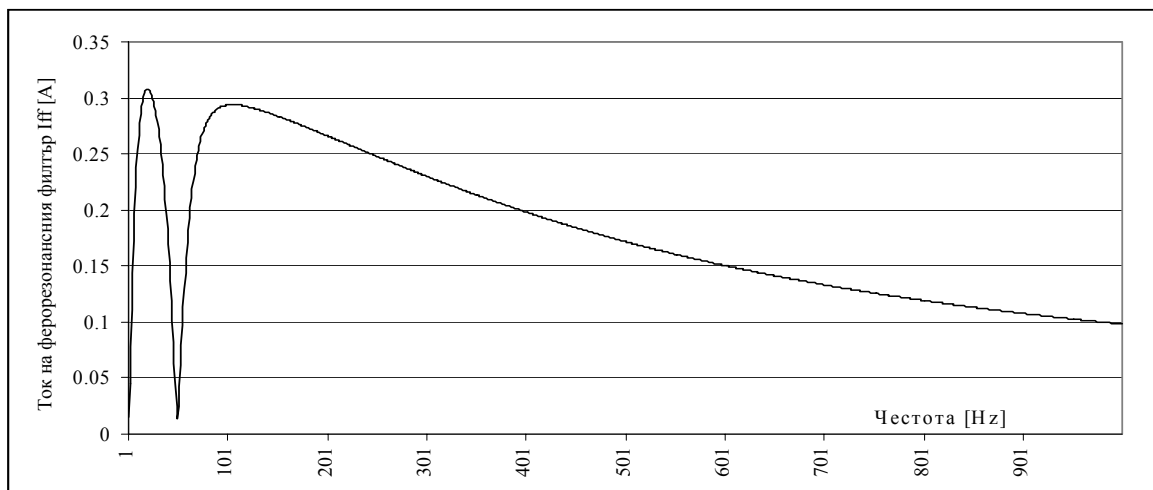
С разработената програма за всеки желан конкретен случай могат да се намерят грешките на трансформатора и да се изследва влиянието на честотата, големината на напрежението, натоварването на намотките за измерване и защита, фактора на мощността на товара и др. Могат например да се направят проверки при съвместно прилагане на цифрови и конвенционални защиты, както и при работа само на цифрови устройства, когато натоварването на КНТ ще бъде много малко.



Фиг. 7.2.1. Зависимост на грешката от товара на КНТ

Ферорезонансният филтър при тази схема е свързан към първичната намотка w_1 . От гледна точка на електрическата схема това е най-сложният начин на свързване. В други случаи такъв филтър се свързва като товар към една от вторичните намотки или в нея се включва активен товар 700 – 800W.

При необходимост системата (7.2.3 - 7.2.14) лесно може да се преработи за тези случаи. Реа-



Фиг. 7.2.2. Характеристика на ферорезонансният филтър

кцията на филтъра от схемата на фиг. 1.1.2.1 при различни честоти е показана на фиг. 7.2.2, където токът през филтъра I_{ff} е представен като функция на честотата.

В глава осма са посочени изводи от изследването на входни напрежения в част втора на дисертацията.

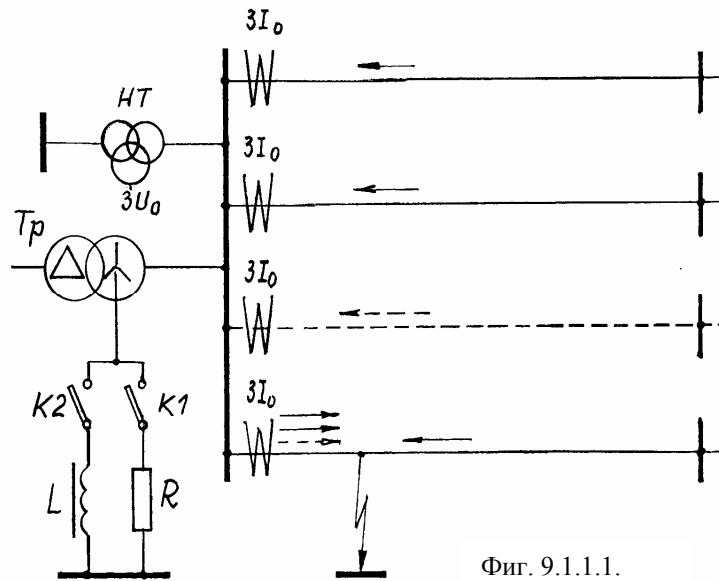
Част трета. Входни величини на земни защиты в разпределителни мрежи

Глава девета. Математическо моделиране на разпределителни мрежи за определяне на входни величини на земни защиты

9.1. Специални математически модели за разпределителна мрежа

9.1.1. Основни уравнения

На фиг. 9.1.1.1 и 9.1.1.2 са показани принципната и еквивалентната схеми на една типична подстанция с високо и средно напрежение. Най-просто захранващият трансформатор се замества с активните му и реактивните загуби (R_{Tr} , L_{Tr}) за всяка фаза. В неутралата е активното съпротивление R и гасителният реактор (ГР) L_0 , R_0 , които по избор се включват или изключват за различните режими на неутралата. Към шините винаги се поставя напрежителен трансформатор (НТ) с две вторични намотки: “звезда” - за фазните напрежения и “отворен триъгълник” - за напрежението с нулева последователност $3U_0$. Представя се опростено чрез елементите R_q и L_q към земя. Параметрите на нормално работещата част от мрежата са с индекс “ n ”, а на повредения електропровод – “ c ”. Електропроводите се представят чрез: надлъжните параметри R_n , L_n и R_c , L_c ; параметрите спрямо земя R_n' , C_n , R_c' и C_c ; междуфазните капацитети C_{nij} и C_{cij} . Товарите (индекси “ a ” и “ b ”) са свързани в триъгълник и могат да участват или не в еквивалентната схема чрез ключовете $K3$ и $K4$. Мястото на повредата е в началото на избран електропровод. Реализира се чрез ключ K и включва преходното съпротивление в мястото на повредата R_k .



При съставяне на еквивалентната схема от фиг. 9.1.1.2 са отчетени условията за не-коректни контури и некоректни клонове.

В съответствие с означенията на фиг. 9.1.1.2 и заземяване през ГР могат да се запишат следните уравнения:

$$(9.1.1.1) \quad L_m \frac{di_1}{dt} + L_c \frac{di_1}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_1 - R_m i_1 - R_0 i_0 - R_c i_c - U_{c1},$$

$$(9.1.1.2) \quad L_m \frac{di_2}{dt} + L_c \frac{di_2}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_2 - R_m i_2 - R_0 i_0 - R_c i_c - U_{c2},$$

$$(9.1.1.3) \quad L_m \frac{di_3}{dt} + L_c \frac{di_3}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_3 - R_m i_3 - R_0 i_0 - R_c i_c - U_{c3},$$

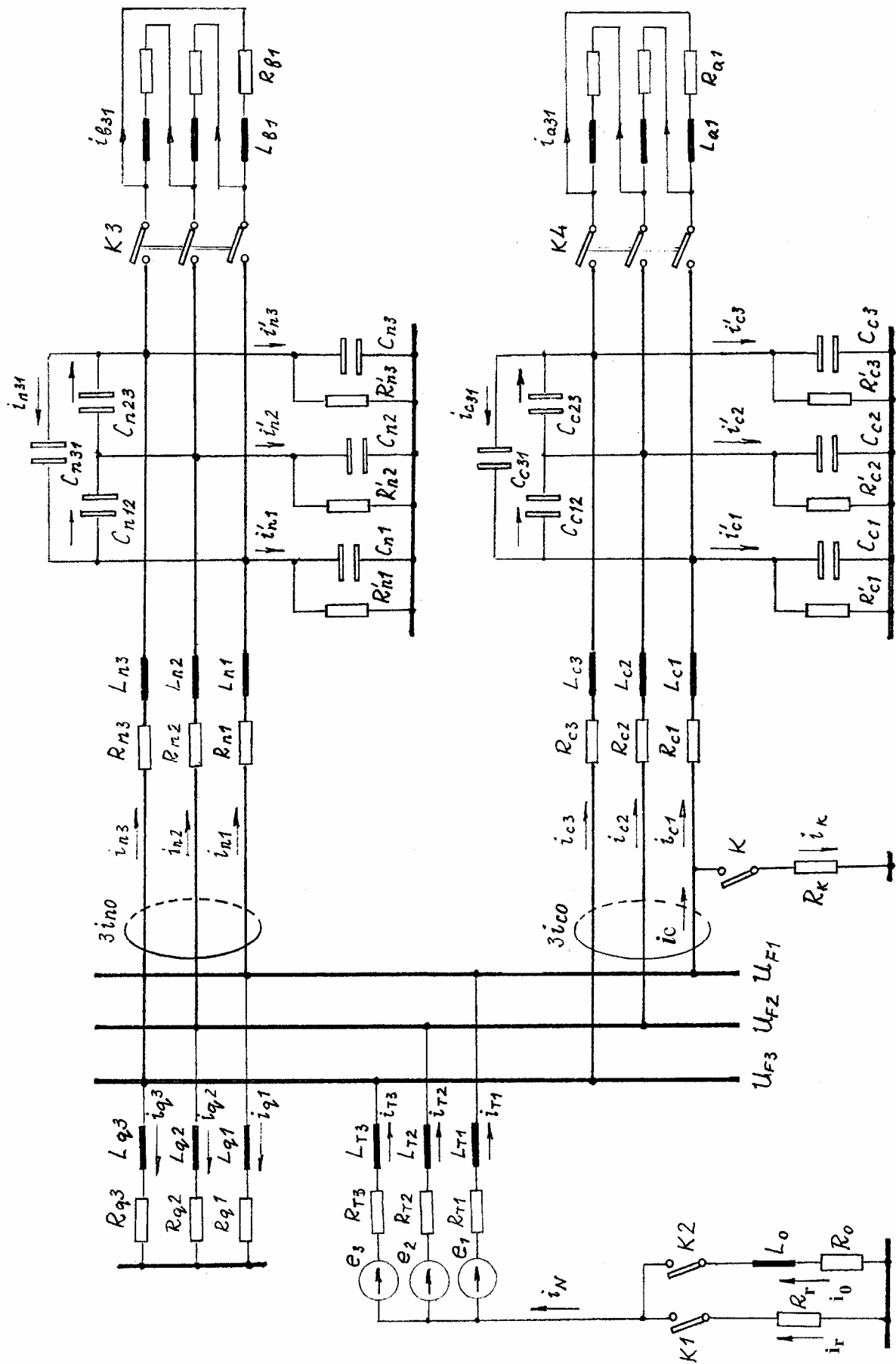
$$(9.1.1.4) \quad L_m \frac{di_1}{dt} + L_n \frac{di_1}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_1 - R_m i_1 - R_0 i_0 - R_n i_n - U_{n1},$$

$$(9.1.1.5) \quad L_m \frac{di_2}{dt} + L_n \frac{di_2}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_2 - R_m i_2 - R_0 i_0 - R_n i_n - U_{n2},$$

$$(9.1.1.6) \quad L_m \frac{di_3}{dt} + L_n \frac{di_3}{dt} + L_0 \frac{dio}{dt} = e_3 - R_m i_3 - R_0 i_0 - R_n i_n - U_{n3},$$

$$(9.1.1.7) \quad C_{c1} \frac{dU_{c1}}{dt} + C_{c12} \frac{d(U_{c1} - U_{c2})}{dt} + C_{c13} \frac{d(U_{c1} - U_{c3})}{dt} = i_{c1},$$

$$(9.1.1.8) \quad C_{c2} \frac{dU_{c2}}{dt} + C_{c12} \frac{d(U_{c2} - U_{c1})}{dt} + C_{c23} \frac{d(U_{c2} - U_{c3})}{dt} = i_{c2},$$



Фиг. 9.1.1.2. Еквивалентна схема на мрежа средно напрежение при земно съединение

$$(9.1.1.9) \quad Cc3*dUc3/dt+Cc13*d(Uc3-Uc2)+Cc23*d(Uc3-Uc1)/dt=ic3,$$

$$(9.1.1.10) \quad Cn1*dUn1/dt+Cn12*d(Un1-Un2)+Cn13*d(Un1-Un3)/dt=in1,$$

$$(9.1.1.11) \quad Cn2*dUn2/dt+Cn12*d(Un2-Un1)+Cn23*d(Un2-Un3)/dt=in2,$$

$$(9.1.1.12) \quad Cn3*dUn3/dt+Cn13*d(Un3-Un2)+Cn23*d(Un3-Un1)/dt=in3,$$

$$(9.1.1.13) \quad i1 = in1+ic1+ik,$$

$$(9.1.1.14) \quad i2 = in2+ic2,$$

$$(9.1.1.15) \quad i3 = in3+ic3.$$

$$(9.1.1.16) \quad i_N = i1+i2+i3 = ic1+ic2+ic3 + in1+in2+in3 + ik.$$

За да се отрази наличието на товари, към системата (9.1.1.1)-(9.1.1.16) се прибавят уравнения:

$$(9.1.1.17) \quad La*dia1/dt + Ra*ia1-Uc1 + Uc3=0,$$

$$(9.1.1.18) \quad La*dia2/dt + Ra*ia2+Uc1 - Uc2=0,$$

$$(9.1.1.19) \quad La*dia3/dt + Ra*ia3+Uc2 - Uc3=0.$$

$$(9.1.1.20) \quad Lb*dib1/dt + Rb*ib1 - Un1 + Un3=0,$$

$$(9.1.1.21) \quad Lb*dib2/dt + Rb*ib2 + Un1 - Un2=0,$$

$$(9.1.1.22) \quad Lb*dib3/dt + Rb*ib3 + Un2 - Un3=0.$$

Когато неутрала е заземена едновременно през активно съпротивление и през ГР към уравнения (9.1.1) до (9.1.12) се прибавя

$$(9.1.1.23) \quad Lo*dio/dt+Ro*io-Rr.ir = 0,$$

а уравнението (9.1.1.16) се променя във вида:

$$(9.1.1.24) \quad ir=i1+i2+i3-io.$$

Ако системата е с неутрала, заземена през активно съпротивление, токът i_o и клонът (R_o , L_o) не съществува. Уравнения от (9.1.1.1) до (9.1.1.6) и (9.1.1.16) се променят.

9.1.2. Входни данни

A. Захранващи напрежения

Захранващите напрежения, съдържащи висши хармоници (в.х.), се представят с уравненията:

$$(9.1.2.1) \quad e1=\text{sum} (Ekmax*\sin(2*\pi*fk*t+fik+ 0,)$$

$$(9.1.2.2) \quad e2=\text{sum} (Ekmax*\sin(2*\pi*fk*t+fik+ k*2*\pi/3,)$$

$$(9.1.2.3) \quad e3=\text{sum} (Ekmax*\sin(2*\pi*fk*t+fik+ k*4*\pi/3),$$

където: k е номерът на хармоника; $Ekmax$ – максималната стойност на k -тия хармоник; fik – начална фаза на k -тия хармоник; fk – честота.

B. Ниво и спектър на висшите хармоници в напрежението

За хармониците се използват данни от изследвания, свързани с електроснабдителните системи и с качеството на напрежението. Стандартът допуска в мрежите средно напрежение коефициентът на изкривяване на синусоидалността на напрежението да бъде до 5%, без да се фиксира спектърът на висшите хармоници. Тази стойност е приета за средна. За най-неблагоприятни, от гледна точка на релейните защиты, минимални хармоници се приемат стойностите $(0,004-0,009)U_H$, а за максималните - $(0,2-0,3)U_H$.

C. Начална фаза на напрежението

Специален интерес представлява случаят, когато началната фаза е $\pi/2$, защото това отговаря на максимален заряд на кондензаторите в повредената фаза и максимални стойности на ударния ток. Характерен е и случаят, когато началната фаза е нулева, защото тогава се създават условия за максимална апериодична съставка в преходния ток и трябва да се отчита нейното филтриране от ТТ.

В разработените програми чрез промяна на максимални стойности и начални фази могат да се моделират различни работни напрежения, несиметрия между фазите, фазови различия и различно участие на висши хармоници.

D. Гасителен реактор

Физическите процеси при з.с. в компенсираните мрежи се определят от параметрите на ГР и това налага неговото точно математическо описание.

Направено е обобщение на характеристиките “напрежение-ток” на три типа ГР. Първи тип – ненаситен, втори тип - линеен и трети тип - ГР, който до номиналното напрежение работи в ненаситената област, но при напрежение над номиналното става с ясно изразено насищане.

E. Преходно съпротивление в мястото на повредата

Установено е, че преходното съпротивление в мястото на повредата се изменя в граници от 0,1 до 15Ω.

Особен интерес представляват земните съединения (з.с.) през прекъсващи дъги, тъй като се създават условия за поява на значителни по големина токове и пренапрежения. За откритите дъги се приема, че дъгата е активно съпротивление; градиентът на напрежението върху дъгата не зависи от тока в определени граници; съпротивлението на дъгата за първите няколко периода може да се приеме за минимално и равно на константа.

Дъгата се моделира чрез резистор, свързан последователно на ключа K , а запалването и изгасването на дъгата се симулират чрез отваряне и затваряне на ключа K . Логическото условие е ключът да се затваря, когато напрежението достигне стойност, равна или по-голяма от някакво напрежение на пробив $maxCrit$, а да се отваря, когато напрежението стане равно или спадне под друга зададена стойност $minCrit$. Записите в ЕЕС на реални токове и напрежения при з.с. през прекъсваща дъга дават възможност да се запишат нови логически условия.

Използването на ГТФ и ТТ при запис на токовете не внася деформации по отношение на основния хармоник и на висшите хармоници, но преобразуването на апериодичните съставки е силно потиснато. Примерите, в които токовете са записани директно с шунт и без ТТ, доказват тази особеност.

F. Капацитети на проводниците спрямо земя

Числените стойности на капацитетите на проводниците спрямо земя се определят аналитично, по таблици или по графики. За вече изградени разпределителни мрежи капацитетите спрямо “земя” е препоръчително да се определят чрез измерване.

G. Напрежителен трансформатор

От електрическа гледна точка НТ е една допълнителна RL верига към събирателните шини. Като се отчита наличието на капацитети, се очаква НТ да създава възможност за резонансни пренапрежения и свръхтокове. Представлява интерес и насищането на стоманата на магнитопровода. В проведеното изследване влиянието на НТ е определено чрез промяна на неговите параметри от 0,5 до два пъти базовите и търсене на условия за резонанс.

9.1.3. **Разработени алгоритми и програми**

A. Постановка на задачата

На базата на уравненията (9.1.1.1) - (9.1.2.24) се съставят алгоритми за намиране на всички токове и напрежения на схемата от фиг. 9.1.1.2. С помощта на програмата Matlab са съставени изчислителни процедури за вариантите от табл. 9.1.3.1.

Табл. 9.1.3.1.

Име на програма	Режим на неутралата	Товар	Висши хармоници	Преходно съпрот., Ω	Гасителен реактор
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Не	3	Линеен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Не	3	Линеен
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Да	3	Линеен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Да	3	Линеен
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Не	3	Наситен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Не	3	Наситен
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Да	3	Наситен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Да	3	Наситен
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Не	3	Ненаситен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Не	3	Ненаситен
<i>vrlr.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Не	Да	3	Ненаситен
<i>vrlrt.m</i>	<i>Ro Lo R</i>	Да	Да	3	Ненаситен
<i>vrl.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Не	Не	3	Линеен
<i>vrlt.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Да	Не	3	Линеен
<i>vrl.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Не	Да	3	Линеен
<i>vrlt.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Да	Да	3	Линеен
<i>vrl.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Не	Не	3	Наситен
<i>vrlt.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Да	Не	3	Наситен
<i>vrl.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Не	Да	3	Наситен
<i>vrlt.m</i>	<i>Ro Lo</i>	Да	Да	3	Наситен
<i>vr.m</i>	<i>R</i>	Не	Не	3	-
<i>vrt.m</i>	<i>R</i>	Да	Не	3	-
<i>vr.m</i>	<i>R</i>	Не	Да	3	-
<i>vrt.m</i>	<i>R</i>	Да	Да	3	-
<i>vi.m</i>	-	Не	Не	3	-
<i>vit.m</i>	-	Да	Не	3	-
<i>vi.m</i>	-	Не	Да	3	-
<i>vit.m</i>	-	Да	Да	3	-

Бележка: Преходното съпротивление в мястото на з.с. може да се изменя, като коректни решения се получават в интервала от $0,1\Omega$ до 1000Ω .

В. Изследване на обусловеността на задачата

Като пример е използвано равенството $A=L^{-1}*R$, т.е.

$$(9.1.3.1) \quad L*(A+dA)=R+dR \quad \text{или} \quad L*dA=dR.$$

Промяната в матрицата на изходните данни R води до промяна в матрицата на числените резултати A . Може да се запише

$$(9.1.3.2) \quad |dA| < |L^{-1}| * |dR|,$$

$$(9.1.3.3) \quad \frac{|dA|}{|A|} < \frac{|L^{-1}| * |L| * |dR|}{|R|},$$

където $|L^{-1}|*|L|$ е число на обусловеност на матрицата L , а командата в Matlab е $cond(L)$.

Първо. При различните варианти на задачата $cond(L)$ достига стойности от 10^{+5} до 10^{+6} . Тези стойности се оценяват като големи и матриците A и B (9.1.3.3), включващи входни данни, са силно чувствителни към промени в матрицата R и по-точно към преходното съпротивление Rk , което е прието с най-голям интервал на изменение. При измененията в реалните граници на индуктивностите и капацитетите от модела, обусловеността на задачата се запазва ($cond(L)$ е в посочения интервал $10^{+5} \div 10^{+6}$) и не поражда необходимост от допълнително изследване.

Второ. Числената обусловеност е мярка за чувствителността на решението на задачата относно изчисленията с плаваща запетая. По метода на обратния анализ на грешката, матрицата A е точно решение на уравнението $(L+dL)*A=-R$. Относителната грешка е в интервала от 0 до $cond(L).eps$, където eps е относителна машинна точност. За персоналния компютър, с който е решавана тази задача (486DX) точността е $eps = 10^{-16}$ и относителната грешка става нищожна. В конкретния случай $cond(L)$ е 10^{+6} , и задачата ще бъде добре обусловена и при много по-неточен компютър, например с $eps = 10^{-10}$.

Получените системи обикновени диференциални уравнения, използвани в различни комбинации (табл. 9.1.3.1) са интегрирани по явен метод с променлива стъпка. Неявни методи не са използвани поради несъществените нелинейности. Подходът с променлива стъпка е избран заради едновременния интерес към преходните и установените режими, изискващи различни стъпки на интегриране за постигане на желаната точност.

С. Изследване на честотните характеристики

Провежда се изследване на честотните характеристики, включващи сингулярни числа. Използвано е свойството, че за една примерна матрица A максималното сингулярно число

$$(9.1.3.7) \quad s_{max} = \max_x \frac{|A * x|}{|x|}$$

е оценка за горната граница на коефициента на усилване за разглеждан входен сигнал.

Изследва се токът I_k в мястото на з.с. Връзката на захранващите напрежения и търсения ток за всеки хармоник е:

$$(9.1.3.8) \quad I_k(j*2*\pi*f) = G1(j*2*\pi*f)*U1(j*2*\pi*f) + G2(j*2*\pi*f)*U2(j*2*\pi*f) + G3(j*2*\pi*f)*U3(j*2*\pi*f),$$

$$(9.1.3.9) \quad I_k(j*2*\pi*f) = | G1 \ G2 \ G3 | \# | U1 \ U2 \ U3 |,$$

където знакът # означава скаларно произведение.

В разглеждания случай

$$(9.1.3.10) \quad dx/dt = Ak*x(t) + Bk*u(t),$$

$$(9.1.3.11) \quad I_k(t) = C*x(t),$$

където:

$x(t)$ са N линейно независими търсени токове,

$u(t)$ - захранващите напрежения,

$I_k(t)$ - токът в мястото на з.с.

C - вектор-ред, състоящ се от нули и единици.

$G(j*2*\pi*f)$ се дефинира от израза:

$$(9.1.3.12) \quad G(j*2*\pi*f) = C*(sI - Ak)^{-1} * Bk$$

и за всяко $j*2*\pi*f$ комплексната матрица G има размерност 1×3 .

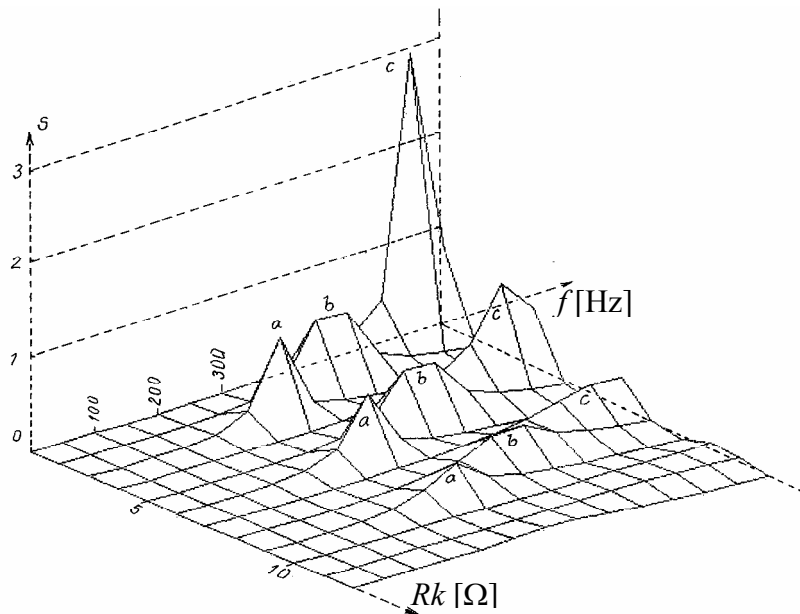
Например за получаване на тока в мястото на повредата за базовия вариант vrl.m (табл. 9.1.3.1) уравнение (9.1.3.12) добива вида:

$$I_k(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \\ I_{n1} \\ I_{n2} \\ I_{n3} \\ U_{c1} \\ U_{c2} \\ U_{c3} \\ U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_k \end{bmatrix}$$

Модульът на комплексната матрица $G(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)$ дава коефициента на усилване на дадената честота " $2 \cdot \pi \cdot f$ ", а аргументът - дефазиранието на тока спрямо всяко от напреженията.

Построява се ходографът на сингулярните числа за честота от 50 до 700Hz. В случая сингулярното число е само едно, тъй като G е вектор с ранг единица. Ходографът на сингулярните числа представлява обвивка "отгоре" на множеството АЧХ, свързващи изхода с всеки вход. Тази оценка е удобна за търсене на резонансни явления. Максимумите показват кои хармоници ще се проявят с преимущество. Изследвано е влиянието на промяната на параметрите на мрежата върху вида на честотната характеристика.

Един пример е показан на фиг. 9.1.3.1. Той се отнася за базовия вариант vrl.m от табл. 9.1.3.1. Променливите параметри са: f : 50, 100, ... 700Hz; R_k : 0,1; 1,0; 3,0; 12,0 Ω ; L_T, R_T : 50%, 100% и 200% от базовите.



Фиг. 9.1.3.1. Обобщени характеристики на мрежа средно напрежение.

α - обобщено представяне; β - представяне по сеченията на преходното съпротивление в мястото на повредата R_k ; параметри на захранващия трансформатор: a) $L_{T*} = 2$, удвоени стойности на параметрите; b) базови стойности; c) $L_{T*} = 0,5$ намалени с 50% стойности на параметрите

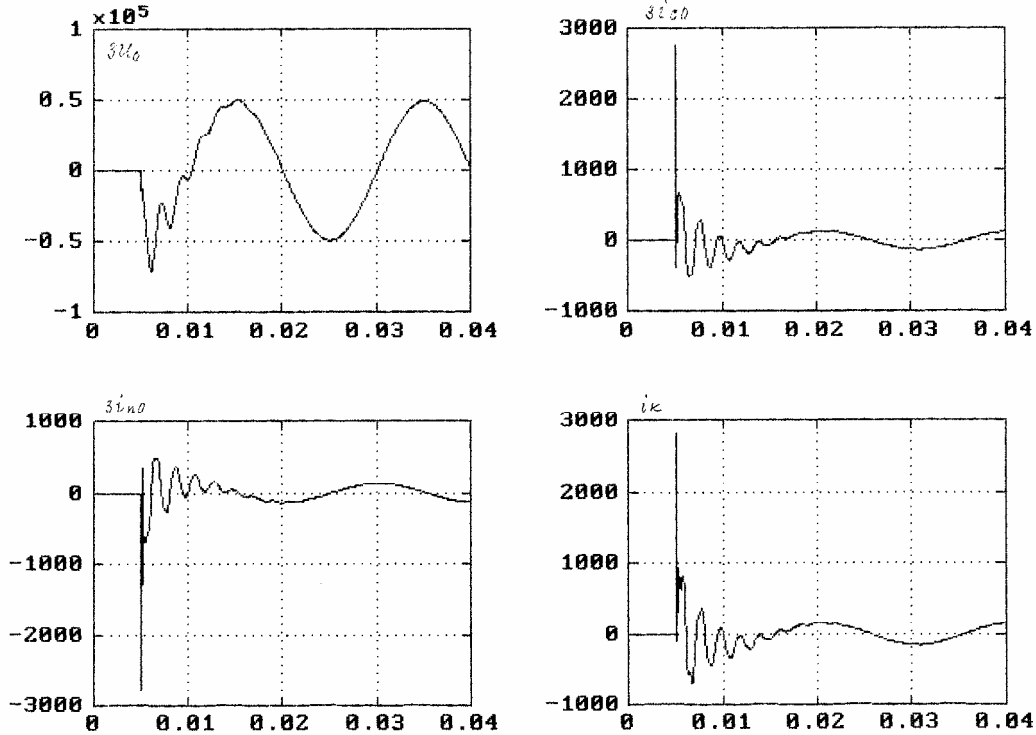
Сингулярното число s , като функция на честота f , показва степента на влияние на хармониците от първи до четринадесети върху изходния ток I_k . Преходно съпротивление R_k намалява чувствително големината на числото s , без да се променят хармониците, за които се появяват максимумите.

Честотите, когато се проявяват максимални стойности на s се променят чувствително от параметрите на захранващия трансформатор ТР. Те са най-ниски, когато параметрите на трансформатора са удвоени спрямо базовите (седми хармоник) и най-високи, когато параметрите на трансформатора са 50% от базовите (13-ти хармоник).

9.2. Резултати от числен анализ на напреженията и токовете при земно съединение

9.2.1. Моделно изследване с Matlab

Обект, използван за числен анализ е п/я “Враца-1”. Тя има напрежения 110kV, 20kV и 10kV и смесена мрежа СН. В съответствие с опита на експлоатационния персонал е избрана за изследване частта 20kV, като з.с. се предвижда в началото на един от изводите, а всички останали изводи са еквивалентирани и представляват неповредената част от мрежата.

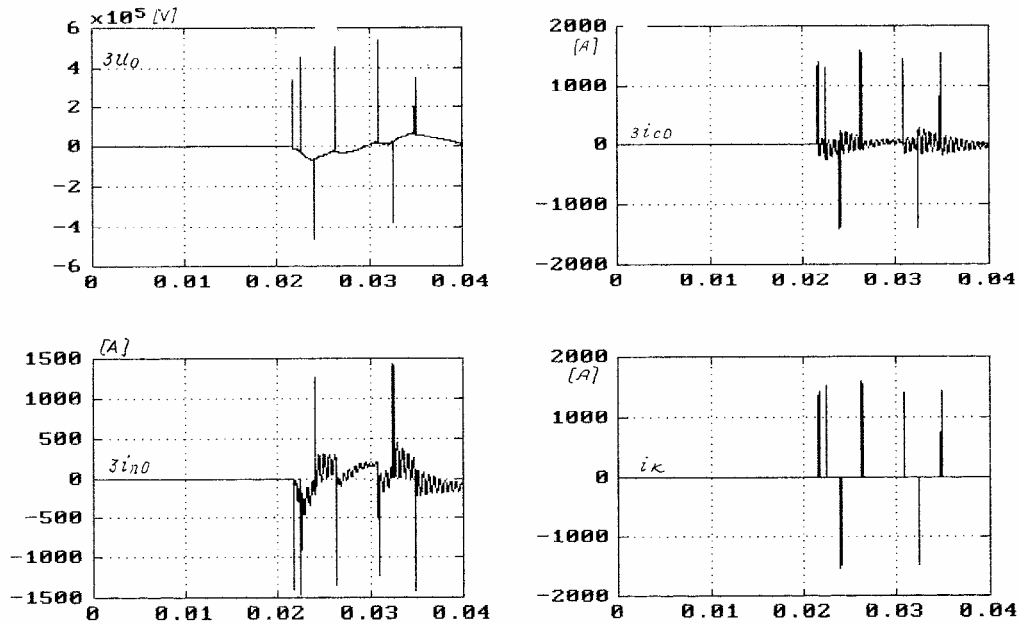


Фиг. 9.2.2.2. Изолирана неутрала, програма *vrl.m* без товар и хармоници

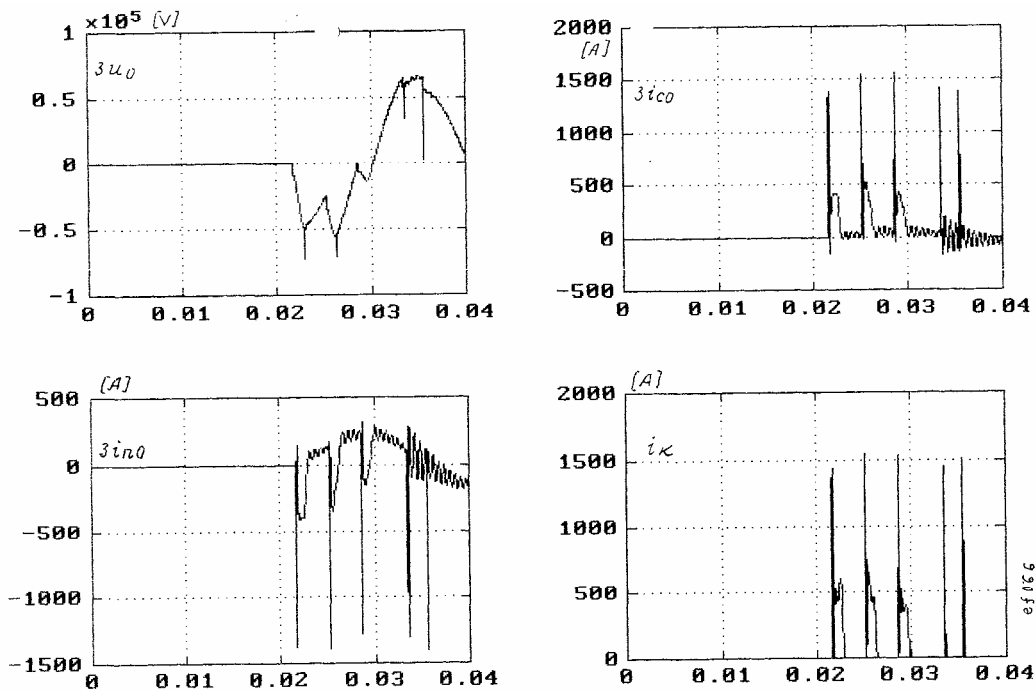
Използвано е голямото разнообразие от възможности за промяна на параметри и всички режими на неутралата. Един от случаите е избран за базов: програма *vrl.m*: неутрала заземена през линейен реактор L_0 , R_0 ; без хармоници и без отчитане на товарите; преходно съпротивление $R_k=3\Omega$.

На фиг. 9.2.2.2 са показани като илюстрация напрежението $3u_0$, токът с нулева последователност в повредения извод $3i_{c0}$, токът с нулева последователност в здравите присъединения $3i_{n0}$ и токът в мястото на повредата i_k при з.с. в мрежа с изолирана неутрала.

Изследвано е още влиянието, което нелинейността на ГР оказва върху тока на повредения електропровод. При линейен ГР липсват висши хармоници. При нелинеен ГР се получава незначителна деформация в тока на повредения електропровод и трети хармоник 2,9%. При наситен ГР деформирането на тока е малко по-значително: трети хармоник 2,8% и пети – 2,7%.



Фиг. 9.2.2.7. З. с. при прекъсваща дъга. Критерий за комутация:
 а) ниво на напрежението на пробив: $maxcrit = 8165V$;
 б) ниво на напрежението при което дъгата изгасва: $mincrit = 1000V$.



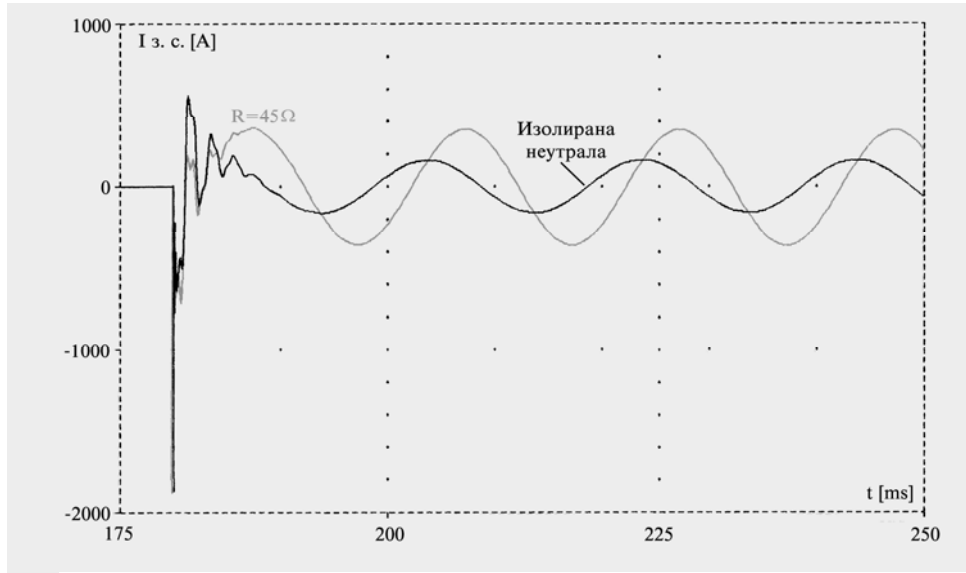
Фиг. 9.2.2.8. З.с. през прекъсваща дъга. Критерий за комутация:
 а) нивото на напрежението на пробива: $maxcrit=8165V$;

Специално внимание се обръща на з.с. при наличие на прекъсваща дъга. Два случая са илюстрирани на фиг. 9.2.2.7 и 9.2.2.8. Получените резултати за напрежението на нулева последователност на шините ($3u_0$), токът на нулева последователност в повредения извод (i_{c0}), сумарният ток на нулева последователност в здравите присъединения (i_{n0}) и токът в мястото на повредата (i_k) по големина и форма са аналогични на тези, измерени директно в ЕЕС и получени на модели в лаб. “Релейна защита” в ТУ-София.

Трудностите на изчислителната процедура се свързват с голямата стръмност на променящото се напрежение и преодоляване на неточностите при фиксиране на критериите за комутация.

9.2.2. Моделно изследване с PSpice

За моделиране е избрана п/я “Панагюрище”, защото в нея са проведени три серии опити с изкуствени з.с., могат да се провеждат сравнения с тях и могат да се проверят възможностите за използване на програмния продукт Pspice (Design Center V.6).



Фиг. 9.2.3.2. П/я “Панагюрище”. Изчислен ток в мястото на з.с. при изолирана неутрала и при неутрала, заземена през $R=45\Omega$

В подстанцията има два трансформатора 110/20kV по 25MVA: №1: без третична намотка и без намотка в “триъгълник”; №2 – с третична намотка. Неутралата има активно съпротивление $R=40\Omega$ и ГР.

Моделирани са с индивидуални данни 11 извода и техните товари. Всеки хармоник на захранващото напрежение (първи, пети, седми и т.н.) се представя с отделен генератор. Изследвано е влиянието на промените в различни параметри на схемата (ниво на висшите хармоници, товар на трансформаторите, заземяване на неутралата през активно и заземяване през реактивно съпротивление) върху входните величини за земната защита. На фиг. 9.2.3.2 са показани едновременно два случая, за да проличи разликата във фазовото изместване на тока при изолирана мрежа и при заземяване на неутралата през активно съпротивление. Преходните токове в изследваните случаи са сходни и ГР практически не влияе на бързия преходен процес.

Прави се заключение, че моделирането в Pspice дава възможност за изследване на мрежата средно напрежение при з.с., като могат да се отчетат освен общите условия и пофазно всеки индивидуален електропровод с неговия товар.

9.2.3. Моделно изследване с ASYMSC

Програмният продукт ASYMSC е разработен в Енергопроект – София за нуждите на отдел “Релейна защита” на НЕК. С него се пресмятат установени т.к.с. и т.з.с. Приложен към п/я “Панагюрище” той дава точни резултати за ефективните стойности на установените токове и напрежения при з.с. Наложил се обогатяване на програмата с възможности за моделиране на силови трансформатори със схема “звезда-звезда”, без третична намотка “триъгълник”.

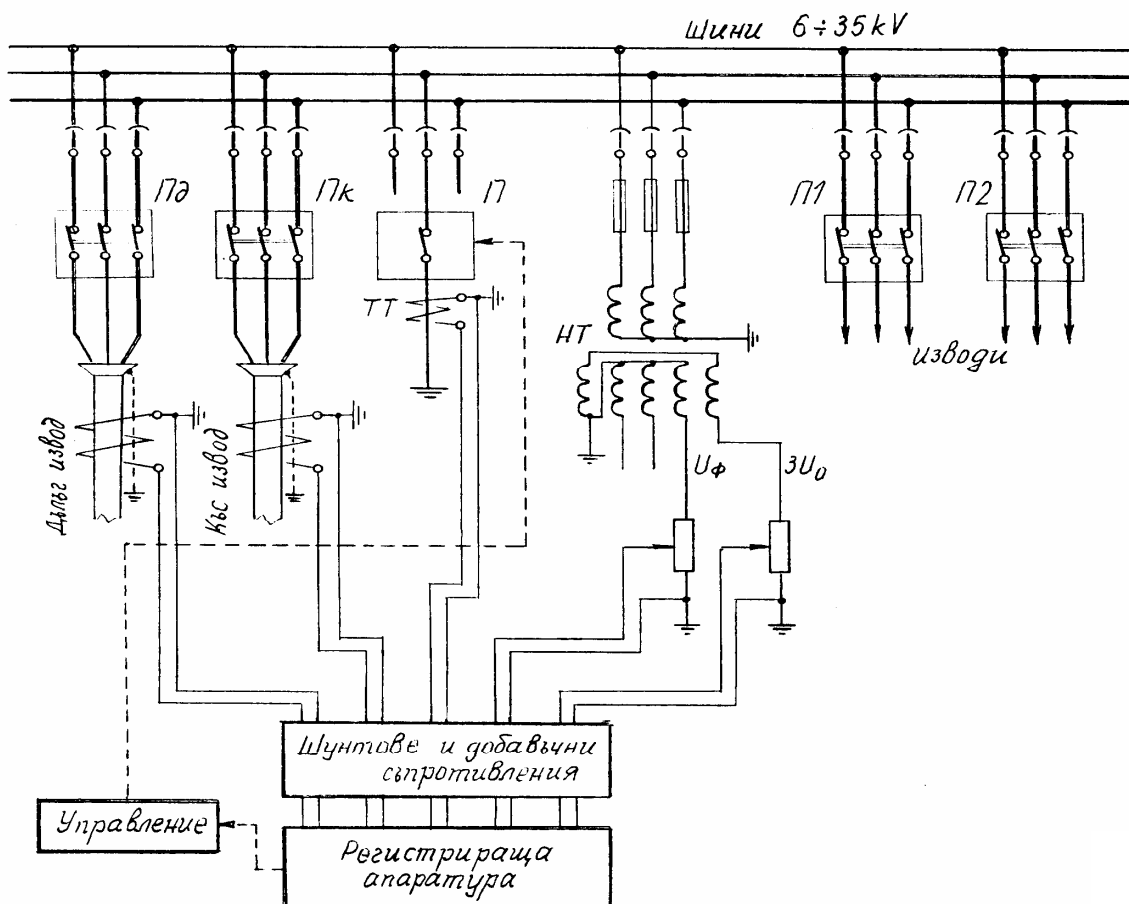
10. Глава десета. Оригинални резултати от експериментално изследване на токовете и напреженията при земни съединения

10.1. Измерване директно в мрежите средно напрежение на токове и напрежения при еднофазно земно съединение

Провеждани са измервания директно в ЕЕС на токовете и напреженията при изкуствени з.с. в мрежи с различни режими на неутралата. В дисертацията са посочени само резултати, които илюстрират типичните случаи и особено тези, които са основа за дефиниране на критериите и показателите за селективно изключване на съоръжението със з.с. Подробни данни са посочени в приложения.

10.1.1. Особености на схемите и организация на изследването

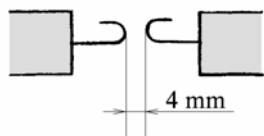
Независимо от мястото на провеждане измерванията се осъществяват по принципната схема от фиг.10.1.1.1. Една от килиите на изследваната подстанция се обзавежда с прекъсвач Π , ТТ с подходящо ниво на изолацията и заземяване на една от фазите. Вторичната страна на ТТ се свързва към регистриращата апаратура. Към регистриращата апаратура се свързват още вторичните страни на филтри за ток на нулевата последователност (ФТНП) на други изводи. Най-съществено за релейната защита е да се запише токът на з.с. в мястото на повредата $I_{зс}$ и на извода с най-голям собствен капацитивен ток $I_{дълъг}$, наричан условно "дълъг извод". Може да се



Фиг. 10.1.1.1. Схема на опитната постановка

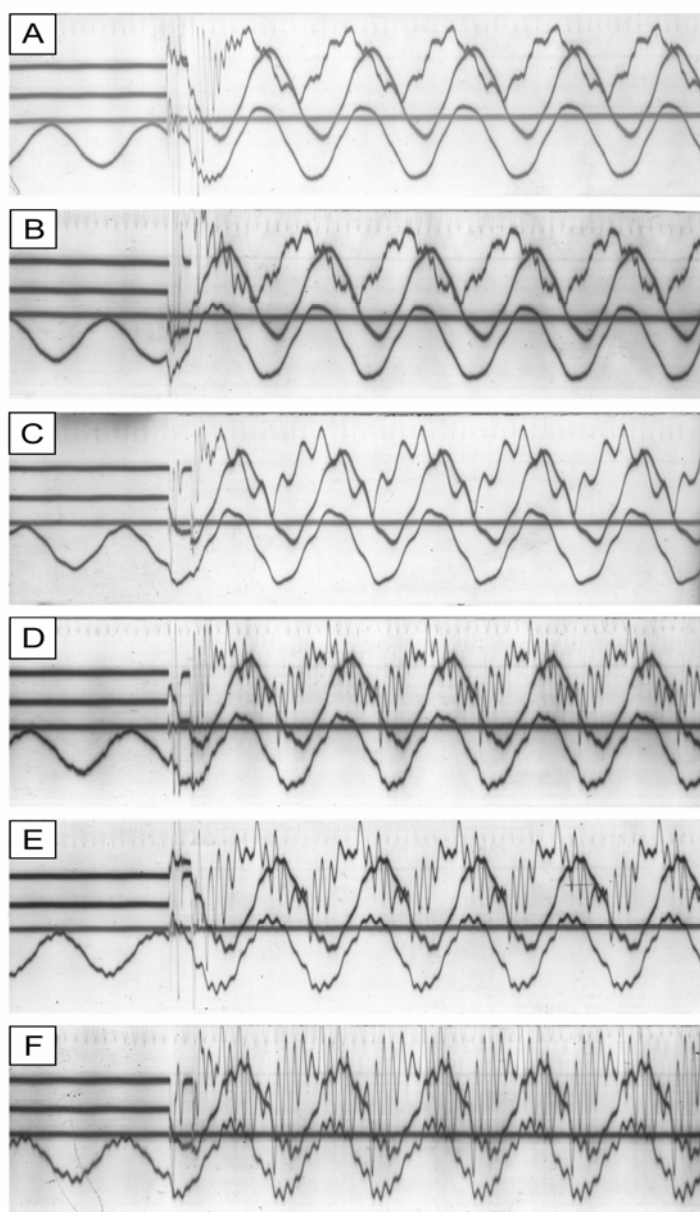
запише в противовес и токът на извода с най-малък собствен капацитивен ток $I_{къс}$, наричан "къс извод". Регистрира се също напрежението с нулева последователност $3U_0$. Схемата за измерване се допълва с подходящи капацитивни делители и осцилоскопи за регистриране на пренапрежения и възстановяващи се напрежения.

Регистриращата апаратура, според възможностите на изследователите в различните години, включва шлейфови осцилографи, електронно-лъчеви осцилоскопи, снабдени с фотоапарати и напоследък - цифрови осцилоскопи и компютри, снабдени с блок АЦП и подходящ софтуер, цифрови регистри на събития и др. Шунтовете, токови сонди и добавъчните съпротивления най-общо показват необходимостта от съгласуване между веригите на измервателните трансформатори и регистриращата апаратура.



Фиг. 10.1.1.2. Искрище за създаване на прекъсваща дъга

Блокът "Управление" дава възможност да се пуска регистриращата апаратура няколко периода преди реализиране на изкуственото з.с. Всяка система за регистриране има предвидено съгласуване с включвателната бобина на прекъсвача $П$. Всички прекъсвачи - за з.с. $П$, за дългия извод $П_{д}$, за късия извод $П_{к}$ и останалите ($П1$, $П2$ и т.н.) са снабдени с максималнотокови защиты с минимално закъснение, за да изключат при поява на двойно з.с.



Земните съединения през прекъсваща дъга се реализират чрез създаване на специално място за пробив. Използват се две метални шини (фиг.10.1.1.2), като разстоянието между тях се регулира по желание от 2 до 8 mm. Настъпването на пробив при тези разстояния не винаги е сигурно и затова между шините се поставя тънък проводник, който гарантира началния пробив, изгаря и дъгата остава да гори между шините. Използва се също и парче кабел ВН, на който на едно място се пробива механически изолацията, като се разчита там да става електрически пробив. В някои случаи се налага да се поставя жичка в мястото на пробива, за да се гарантира началото на дъгата.

В т. 10.1.3.D се описва директно записване на първичен и вторичен ток на ТТ при изкуствено з.с. в компенсирана мрежа.

10.1.2. Места на провеждане на експерименти

Изкуствени з.с. с регистриране на токове и напрежения са реализирани в различни подстанции на ЕЕС: Открит рудник "Кремиковци", п/я "Самоков", п/я "Ал. Наумов" и п/я "Красно село" - София, п/я "Панагюрище" – три серии опити, п/я

Фиг. 10.1.3.1. Земни съединения при различен хармоничен състав на напрежението. П/я „Руднична”, Кремиковци

"Рила", п/я "Враца", п/я "Горна Оряховица", п/я "Славейков" - Бургас. Записването на токовете и напреженията е провеждано с шлейф-осцилографи, а в п/я "Панагюрище" и п/я "Славейков" – с цифрови.

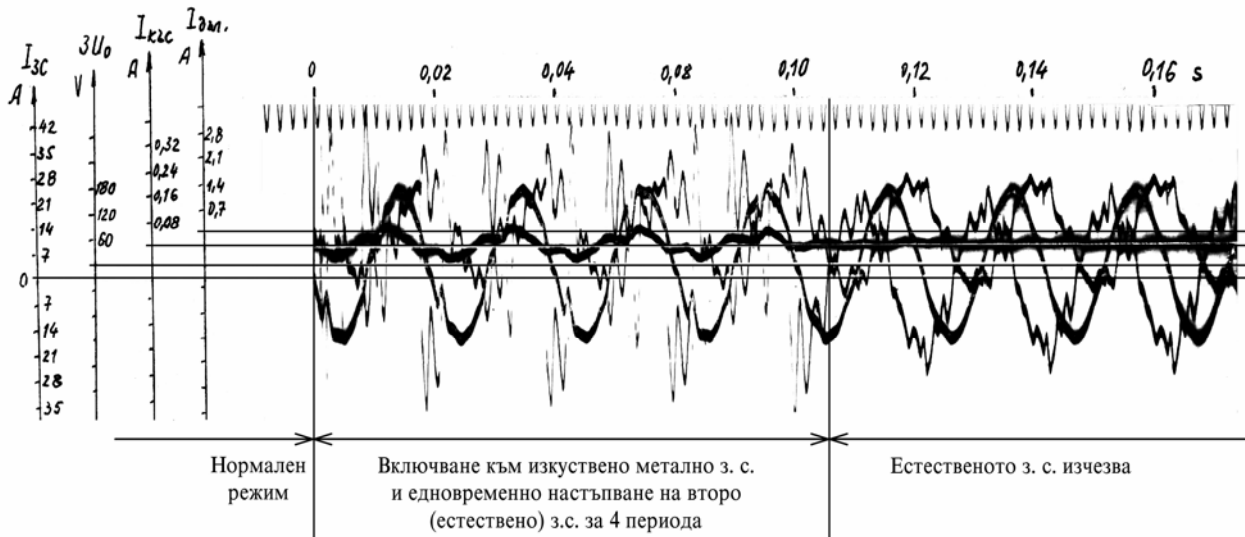
10.1.3. Характерни резултати при трайни и преходни земни съединения

А. Трайни земни съединения

Измерванията при трайни з.с. доказват наличието на променящи се в.х. в тока и напрежението на нулева последователност. На фиг. 10.1.3.1 са посочени 6 случая (А,В,С,Д,Е,Ф), заснети в продължение на няколко часа в мрежа с изолирана неутрала. Различието е в големината и в характера на товара (багери в открит рудник “Кремиковци”), които водят до деформация на напрежението на шините U_{ϕ} . Тази деформация се проявява в напрежението на здравите фази спрямо земя U_{ϕ} (ред 4), в напрежението $3U_0$ (ред 2) и в тока $3I_0$ (ред 1). Случаите са подредени по възходящ ред на висшите хармоници. Даже незабележими деформации на напрежението в нормален режим (случаи А и В) водят до чувствително деформиране на т.з.с. Най-силно се проявяват хармониците с номера 5, 11 и 13.

В. Преходни земни съединения

С тези резултати се доказват два факта - наличието на ударни стойности за величините $3i_0$ и $3i_0$ с определен знак на първата полувълна и наличие на висши хармоници в установения режим на з.с.



Фиг. 10.1.3.3. Прерастване на изкуствено метално з.с. и естествено з.с.

П/я “Руднична”, Кремиковци

Токове	В място на з.с.	През “Дълъг” извод	През “Къс” извод
I_y , А	> 42	> 3,50	-
$i_{уст. max}$, А	36,0	1,50	-
I_{cp} , А	12,2	0,70	-
I_{eff} , А	13,5	0,78	-

Напрежения: $3u_{0, max} = 165V$; $3U_0 = 115V_{eff}$

На фиг. 10.1.3.3 са показани осцилограми на особен случай, когато освен изкуственото з.с. се появяват и естествени з.с. Системата е с напрежение 20kV и има изолирана неутрала.

От анализа на осцилограмата на фиг. 10.1.3.3 се прави следното описание на процеса. Изкуственото з.с. води до поява на пренапрежения, които пораждат естествено з.с. в друга точка на системата. Стига се до двойно з.с., свързано с голям ток на повредата. След 4 периода (около 80ms) естественото з.с. изгасва самостоятелно и остава само тока на изкуственото.

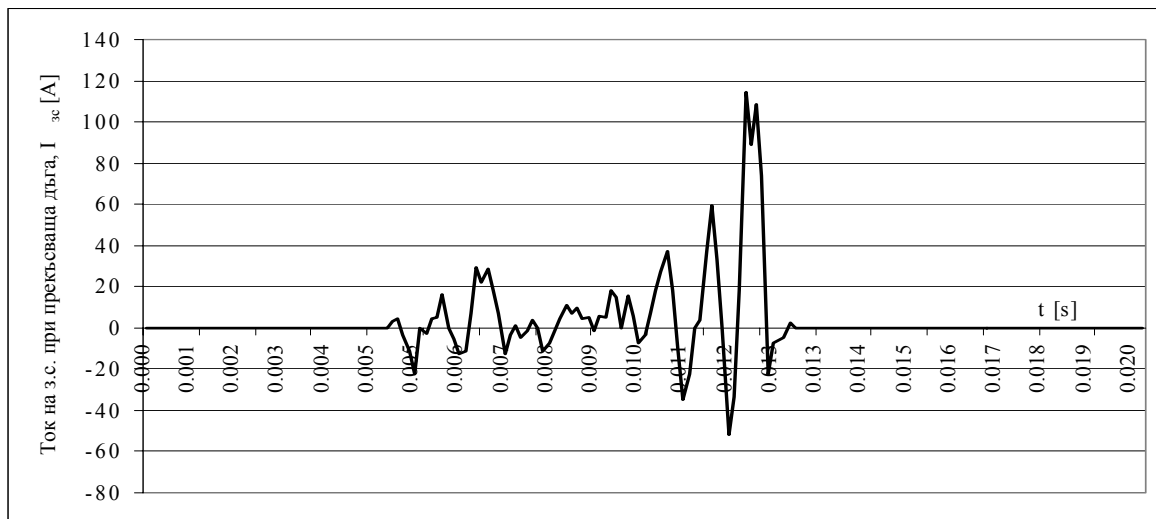
Прерастващите з. с. и к. с. в разпределителните мрежи се регистрират и изучават пълно при наличие на непрекъснато включени специализирани регистратори (п/я “Панагюрище”) или информационни системи, свързани към цифрови защиты (станция на фирмата РОКОН – София в п/я “Славейков” – гр. Бургас).

Още от първите резултати на тези регистратори могат да се направят обективни заключения за входните величини на релейните защиты в следните направления: *a)* големина на фазни и линейни токове и напрежения при преминаване от нормален режим към повреда и във всички възможни преходи от едно към друго к.с.; *b)* наличие и големина на преходно съпротивление в мястото на повредата; динамика на големината на преходното съпротивление; *c)* построяване на векторни диаграми за предаварийни режими и за к.с. и з.с.; *d)* провеждане на хармоничен анализ на токовете и напреженията, както и филтриране на величините; *e)* оценка на качеството на електроенергията; *f)* определяне на симетричните съставки; *g)* прецизен анализ на работата на релейните защиты и на измерителите на разстоянието до мястото на повредата. При липса на измерител на разстоянието до мястото на повредата има възможност да се направи пресмятане на това разстояние.

С. Резултати при земно съединение през прекъсваща дъга

Земните съединения през прекъсваща дъга са създавани изкуствено по описания в т. 10.1.1. начин.

a) На фиг. 10.1.3.9 е показан ток I_{3c} при прекъсваща дъга в п/я “Руднична”, Кремиковци. В тази мрежа измереният траен ток на з.с. има ефективна стойност 13,5А.



Фиг. 10.1.3.9. Ток на з.с. при прекъсваща дъга; П/я “Руднична”, Кремиковци

Прекъсващата дъга се реализира чрез въздушна междина 5mm, в която е поставена първоначално жичка като предпазител, за да се гарантира началното запалване на дъгата. Отчитат се следните особености: 1) Токът има ударна стойност около 335А и колебания с честота около 1000Hz. 2) Дъгата се запалва един път на всеки период от основната честота. 3). На осцилограмата: максимална стойност на т.з.с. - около 118А; ефективна стойност - 6,54А; средна стойност - 3,06А. 4) Токът има компоненти с висока честота и се налага записване с голям брой точки. Регистриращото устройство трябва да има способност да записва добре токове с честота 2kHz. В случая са отчетени 180 точки на период и са пресметнати хармониците до №40. 5) Определящи са хармониците с големи номера. Има и четни хармоници. Ако се приеме първи хармоник за 100% (5,30А), то над него по стойност са хармониците с номера 19 (113,51%), 21(107,66%), 22(161,85%) и 23(147,53%). Типичният за з.с. пети хармоник е на 28-мо място с 31,31% (1,66А).

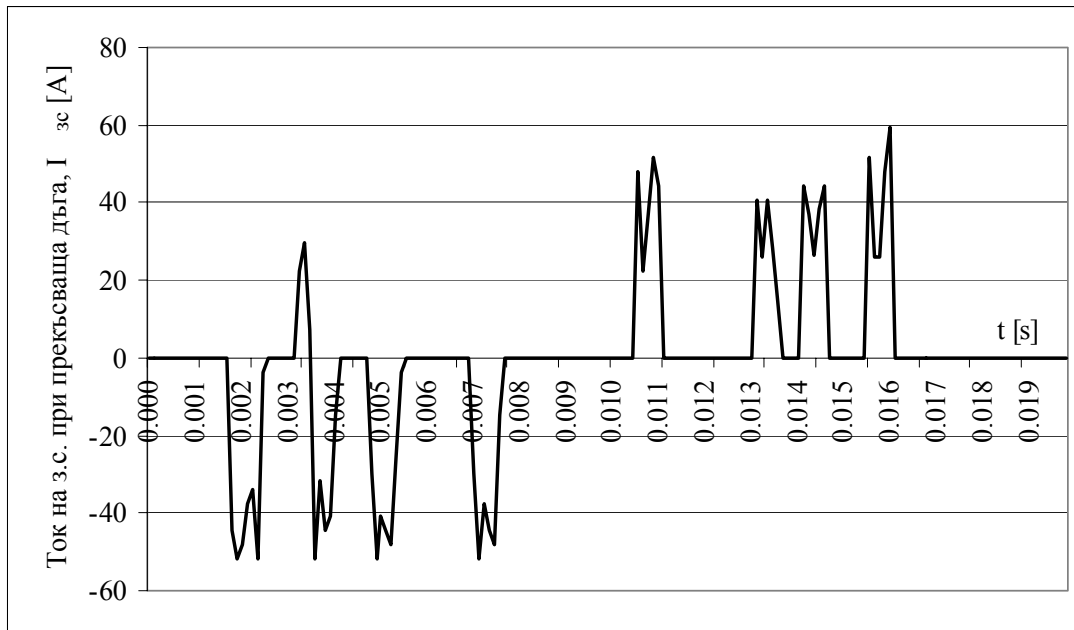
b. Случай на многократно за всеки полупериод запалване на дъга е показано на фиг.10.1.3.13. Мястото на пробива е в парче кабел с изкуствено повредена изолация, така

че дъга гори между мантията на кабела и жилото му. Максималната стойност на т.з.с. е 60А, а ефективната - 18,9А.

За хармоничния анализ са използвани 180 точки за периода на 50Hz. Най-значителен по големина е основният хармоник (9,81А – 100%), а представляващият особен интерес 5-ти хармоник е на 19-то място с големина 16,12%.

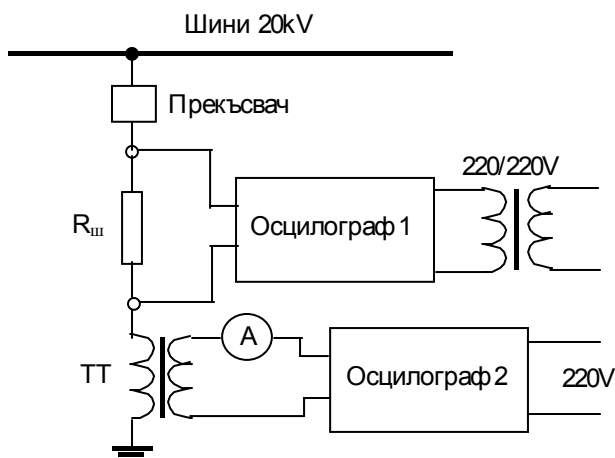
D. Оригинални резултати от първично измерване на тока на земно съединение

Информацията за т.з.с. се получава чрез ТТ или ТТФ. Необходимостта от доказване на достоверността на информацията налага да се измерва директно и първичният и вторичният ток на трансформаторите. За целта записващото устройство (осцилоскоп) се поставя на нивото на ВН, а



Фиг. 10.1.3.13. Ток при з.с. при прекъсваща дъга; П/я “Руднична”, Кремиковци

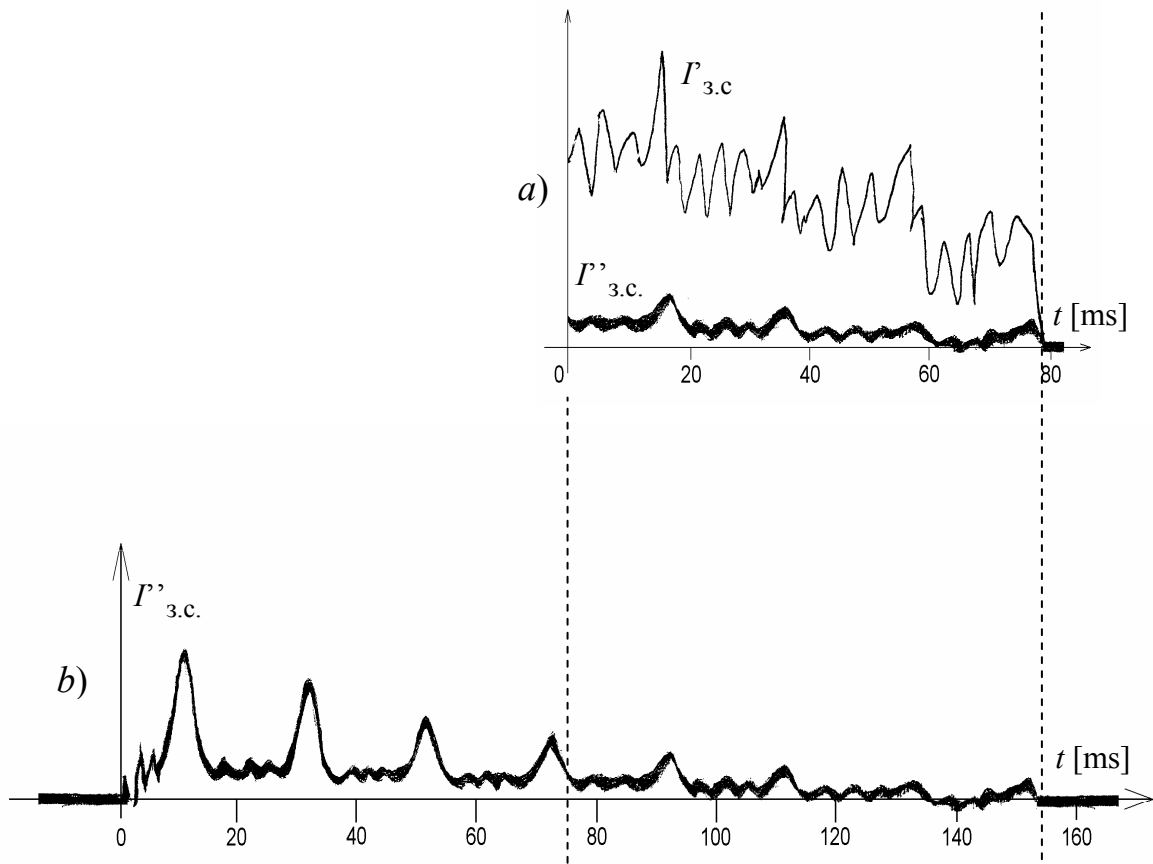
токовият сигнал се подава към него от шунт. Оперативното захранване на осцилоскопа в този случай се реализира през специален трансформатор 220/220V с изолация между първична и вторична намотка, изпълнена за работното напрежение на съответната шинна система ВН (фиг. 10.1.3.14). Падът върху шунта се записва от осцилограф №1, свързан към потенциала на изпитваната фаза и изолиран спрямо земя.



Фиг. 10.1.3.14. Опитна постановка за осцилографиране на първичния и вторичния ток на метално з.с.

По-долу са показани записи на първичен и вторичен ток на метално з.с. в компенсирания мрежа на п/я “Самоков”, работеща в режим на точна компенсация.

Фиг. 10.1.3.15 показва запис, при който вторичният ток $I''_{з.с.}$ е записан пълно, но първичният ток $I'_{з.с.}$ е излязъл извън обхвата на осцилографа и записът е уловил последните четири пе-



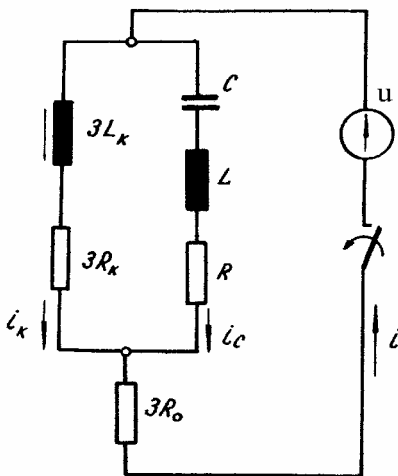
Фиг. 10.1.3.15. П/я “Самоков”. Изкуствено метално з.с. Първичен $I'_{з.с.}$ и вторичен $I''_{з.с.}$ ток на з.с. Вторичният ток е регистриран за целия опит, а първичният е влязъл в обхвата само за последните четири периода.

риода.

От анализа на двата тока на з.с. могат да се направят следните заключения:

- Първичният ток на з.с. $I'_{з.с.}$ в точно компенсирания мрежа продължително време лежи изцяло над абсцисната ос със средна стойност повече от 20А. Първото преминаване на тока през нулата може да стане десетки периоди след появата му, което поставя в друга светлина оценката за самоизгасването на дъгите в мястото на з.с.
- Времето на затихване е много голямо и ТТ не пропуска аperiодичната съставка на първичния ток.
- От висшите хармоници най-силно е изразен петият.

Нетрадиционно в горните резултати е наличието на значителна и бавно затихваща аperiодична съставка в първичния ток на з.с. За качествено обяснение на процесите се използва максимално опростената схема на компенсирана мрежа (фиг. 10.1.3.17).



Фиг. 10.1.3.17. Опростена еквивалентна схема на компен-

Установеният процес при липса на преходно съпротивление ($3R_0 = 0$) дава за тока през кондензатора

$$(10.1.3.1) \quad i_{C \max} = \frac{u_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \sin(\omega t + \Psi_u + \varphi_C),$$

$$\varphi_C = \operatorname{artg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Токът през ГР има установена съставка

$$(10.1.3.2) \quad i_{k \max} = \frac{u_{\max}}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L_k^2}} \sin(\omega t - \Psi_u - \varphi_k),$$

$$\varphi_k = \operatorname{artg} \frac{\omega L_k}{R_k}.$$

Преходният процес във веригата с кондензатор е псевдопериодичен ($b < \omega_0$) и се описва с уравненията:

$$(10.1.3.3) \quad b = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \Omega = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}, \quad \Psi_C = \operatorname{artg} \frac{\Omega}{b},$$

$$i_{C \text{св}} = -i_{C \max} e^{-bt} \frac{\omega_0^2}{\omega \Omega} \cos(\Psi_u - \varphi_C) \sin \Omega t +$$

$$+ i_{C \max} e^{-bt} \frac{\sin(\Psi_u - \varphi_C)}{\sin \Psi_C} \sin(\Omega t - \Psi_u).$$

Същите условия за веригата на ГР дават

$$(10.1.3.4) \quad i_{k \text{св}} = -i_{k \max} \sin(\Psi_u - \varphi_k) \exp\left(-\frac{t}{T_k}\right),$$

$$T_k = \frac{L_k}{R_k}.$$

По горните уравнения е съставена програма в Matlab за мрежа 20kV и сумарен капацитивен ток около 100A (п/я “Самоков”). Резултатите от изчисленията съвпадат добре с експерименталните и водят до обяснението, че точното компенсирание прави незабележим основния хармоник в т.з.с. Остава аperiodичната компонента, предизвикана от преходния процес в ГР и петия хармоник, който не се влияе от компенсацията.

Е. Нетрадиционна липса на висши хармоници при з.с. в п/я “Панагюрище”

Проведените три серии изкуствени з.с. в п/я “Панагюрище” дават възможност да се изследват всички варианти на работа на неутралата. Един от характерните и неочаквани резултати е липсата на висши хармоници в тока и напрежението на нулева последователност. Обяснението е единствено в конкретното съчетаване на параметрите на мрежата, товарите и липсата на хармоници в захранващото напрежение.

Ф. Изводи от експерименталното изследване на земни съединения в ЕЕС

- Изкуствените з.с. в 8 подстанции на ЕЕС потвърждават редица известни от нашата и чуждата литература факти относно: ток в мястото на з.с., ток в извода с най-голям собствен капацитет, напрежение на нулевата последователност, напрежение на здрава фаза, напрежение на повредена фаза.
- Особено полезни за анализ на събитията са стационарните регистратори на събития в подстанциите средно напрежение. Необходимо е честотата на сканиране да се подчини на изискванията за запис на преходните съставки.
- Благодарение на използваната цифрова техника се потвърждават очаквани факти:
 - Хармоничният състав на токовете и напреженията и статистика, която потвърждава като типично участието на пети хармоник.
 - Най-често ударните токове са на порядък по-големи от установените.
 - При оценка на съвпадането при вътрешна и несъвпадението при външна повреда на знаците на първите импулси на преходните ток и напрежение трябва да се сканира с достатъчно висока

честота (например над 500 точки на период), за да се съпоставят импулсите с най-малка енергия и възможностите на входния токов преобразовател на земната защита. Констатира се, че първата полувълна на напрежението изпълва полупериода, т.е. има продължителност около 10ms. Първият импулс на тока може да бъде много кратък – под 1ms.

– Ударните токове не зависят от режима на неутралата и могат да се използват като критерии за пускане на земната защита и селективно определяне на извода със з.с.

d) Нови факти:

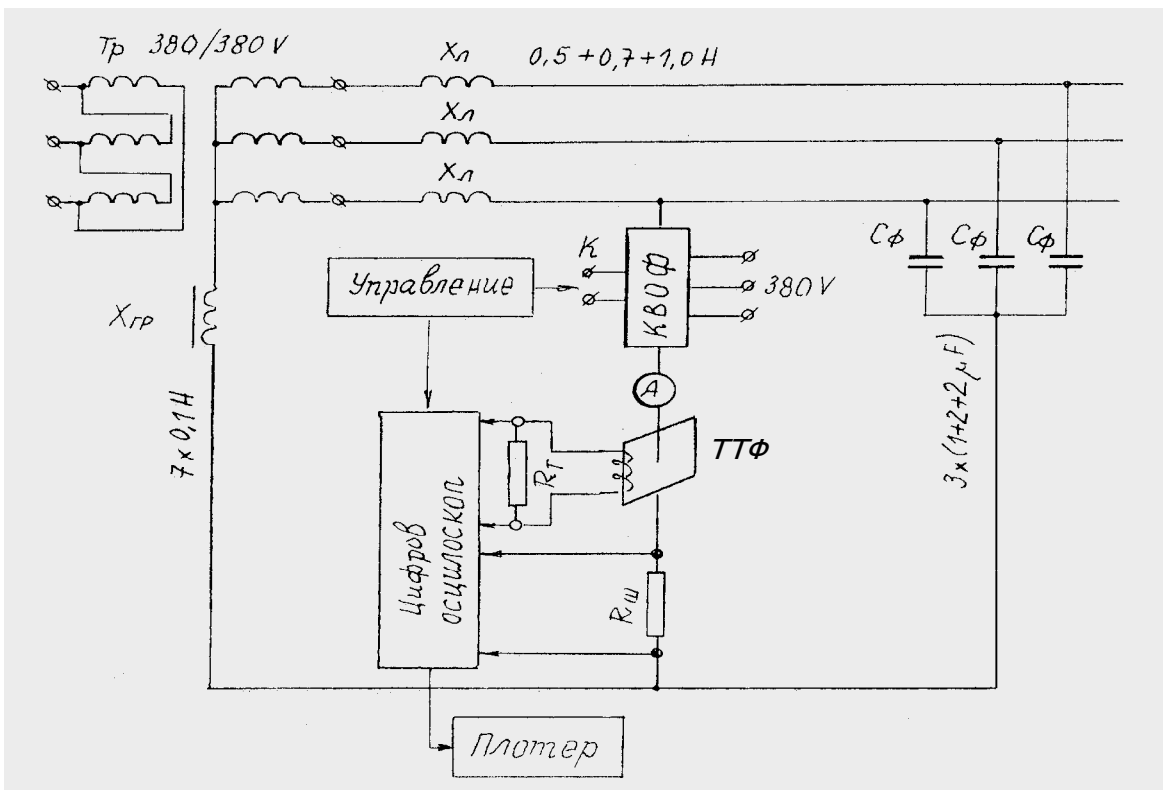
– Записани са директно с шунт първични т.з.с. В компенсирани мрежи те имат значителни апериодични съставки и първото пресичане на тока през нулата може да стане след десетки периоди.

– Възможно е да има подстанции, където з.с. да не се съпровождат с видими висши хармоници в тока и напрежението с нулева последователност. Висшите хармоници не могат да бъдат единствен критерии за селективна земна защита.

– З.с. през прекъсваща дъга дават непредвидими по форма сигнали с големина, близка до ударните стойности на т.з.с. Токовете могат да се класифицират по: брой на появяване за един период; честота на затихващата преходна компонента; максимална стойност; запълване на периода; ефективна, средна стойност и хармоничен състав.

10.2. Оригинални лабораторни устройства за генериране на токове и вторични напрежения, които съответстват на реални земно съединение

В лабораторията по "Релейна защита" към катедра "Електроенергетика" на ТУ - София са създадени оригинални устройства, които дават възможност за физическо моделиране на земни съединения и изпитване на реални земни защиты, както и да се включат съответните ТТ или ТТФ. Моделите включват описаните в т. 2.2.2 устройства (захранващ трифазен трансформатор; модел на електропровод ВН; тиристорен ключ за включване в определена фаза (КВОФ)), както и модел на ГР; модел на капацитета на фазните проводници спрямо земя; модел на индуктивност



Фиг. 10.2.3.3. Схема за лабораторно изпитване на ТТФ с несинусоидални токове и с ударни токове

на фазните проводници; регулируемо електро-механично устройство за симулиране на прекъсваща дъга и др.

А. Симулиране на синусоидални токове с апериодични съставки

Моделирането на синусоидални токове до 100А става с модела на електропровод ВН. Степените на превключване на линейните индуктивности и на резисторите са изпълнени на монетния принцип, позволяват произволно последователно, паралелно или смесено свързване, поради което регулирането на тока става на много малки степени. На схемата от фиг. 10.2.3.3 моделът на електропровод високо напрежение е показан чрез индуктивността X_L . Времекоэффициентът на затихване на апериодичната компонента T_a се изменя чрез самостоятелен подбор на големината на индуктивностите и на активните съпротивления.

В. Симулиране на несинусоидални и ударни токове

Използува се схемата от фиг. 10.2.3.3. Към захранващия трансформатор T_r се включват моделът на мрежа средно напрежение. Нивото на в.х. не се управлява.

С. Сравняване на резултатите

Проведеното изследване в дисертацията показва добро съвпадане на резултатите от математическо моделиране, измервания директно в ЕЕС и измервания на модели в лабораторни условия.

Особеностите са следните:

a. Сравняват се резултатите главно за мрежите с изолирана неутрала и компенсирани мрежи. Заземяването през неголямо активно съпротивление също се моделира, но интересът към него е по-малък, защото с токова защита на токовете $3I_0$ се постига лесно необходимата сигурност и чувствителност на земните защиты. При изследването на преходни процеси при заземяване през активно съпротивление R и при комбинирано заземяване ($R+L$) се констатира високи стойности на тока през първата полувълна на преходния процес – до няколко хиляди ампера. Този резултат трябва да се отчита при оценка на сигурността на защиты, реализирана на $3I_0$ и да се сочи като преимущество на защиты, използващи параметрите на преходния процес.

b. Съставката с промишлена честота на установените токове и напрежения винаги се изчислява. Много често провежданите измервания показват чувствителни различия с изчисленията. Според „Наредба за техническа експлоатация на електрически централи и мрежи”, чл. 810 (2) измерването на капацитивните токове при земно съединение се извършва при въвеждане в експлоатация на устройствата за заземяване и при значителни изменения в дължината и конфигурацията на мрежата, но най-малко веднъж на 5 години. При наличие на регистратори на к.с. тези резултати могат да се оценяват много по-често.

c. Несинусоидалните токове и напрежения са обект на измерване в ЕЕС, физическо и математическо моделиране. Понеже интересът е до сравнително ниската честота от 2000Hz (40-ти хармоник), няма особени технически проблеми нито при измерването, нито при пресмятането им.

Заснетите в ЕЕС и в лабораторни условия криви показват разнообразие в големината на в.х. Най-ниското практическо ниво на хармониците не може да се фиксира еднозначно и се определя експертно.

d. Особен случай е констатиран в п/я “Панагюрище”, където липсват в.х. в напрежението и тока на з.с. Този факт засилва констатираното разнообразие в условията на работа на земните защиты, използващи в.х..

e. Преходните токове и напрежения също се изследват по трите възможни начина. Резултатите са еднозначни:

- Ударните токове превишават по стойност неколкостранно установените. Най-големи са кратностите, определени аналитично - десетки пъти установените. По-малки (5-10 пъти) са измерените в ЕЕС. От този порядък са и измерените в лабораторни условия.
- Във всички случаи знаците на тока и напрежението на нулева последователност съвпадат за повреденото присъединение и са различни за здравите.
- Режимът на неутралата, товарите, хармониците в захранващото напрежение, НТ и нелинейността на ГР влияят незначително върху преходните съставки при з.с.
- При експеримент в ЕЕС не може да се влияе върху началната фаза на напрежението, нивото и спектъра на в.х., вида на товарите, на НТ и на ГР. При физическото моделиране се избира удобно началната фаза, но формата на напрежението зависи от качествата на захранващата

мрежа и близките потребители. Най-пълно е изследването с разработения математически модел, още повече че се доказва адекватността му с експериментите.

f. Токове и напрежения при земно съединение през прекъсваща дъга имат всички особености на преходния процес, но към него се добавят и особеностите на горене на дъгата. Оказват се полезни резултатите, получена по трите начина.

Създаването на точни математически модели се ограничава от невъзможността да се опише точно режимът на електрическата дъга. Реализирано е моделиране на запалването на дъгата при определено ниво на напрежението ($R_{\text{дъга}} = 0$) и изгасване на дъгата при друго зададено ниво на напрежението ($R_{\text{дъга}} = \infty \Omega$). Само тези два фактора дават достатъчно разнообразни форми на токовете и напреженията и позволяват качествено сравняване с експериментите.

10.3. Експериментално изучаване в електрическите централи на токове и напрежения с нулева последователност при синхронни генератори

В тази точка са показани и анализирани автентични резултати от експериментално изучаване директно в електрически централи на токове и напрежения, свързани с пов-реди към “земя”.

10.3.1. Входни величини при пускови изпитвания за въвеждане на нова 100%-на земна статорна защита в АЕЦ “Козлодуй” – ЕП-1

Доказва се количествено съотношението на напрежението на неутралата U_N и напрежението на нулева последователност на изводите на генератора $3U_0$ по време на пускови изпитвания за въвеждане на нова 100%-на земна статорна защита тип RAGEA (ABB) на турбогенератор G6.

Регистрирани са входни величини при: работа на генератора на празен ход; трифазно късо съединение след блочния трансформатор; земно съединение в изводите на генератора; земно съединение в неутралата на генератора; проби под товар.

Резултатите потвърждават очакваните съотношения на входните величини и правилното действие на защитите.

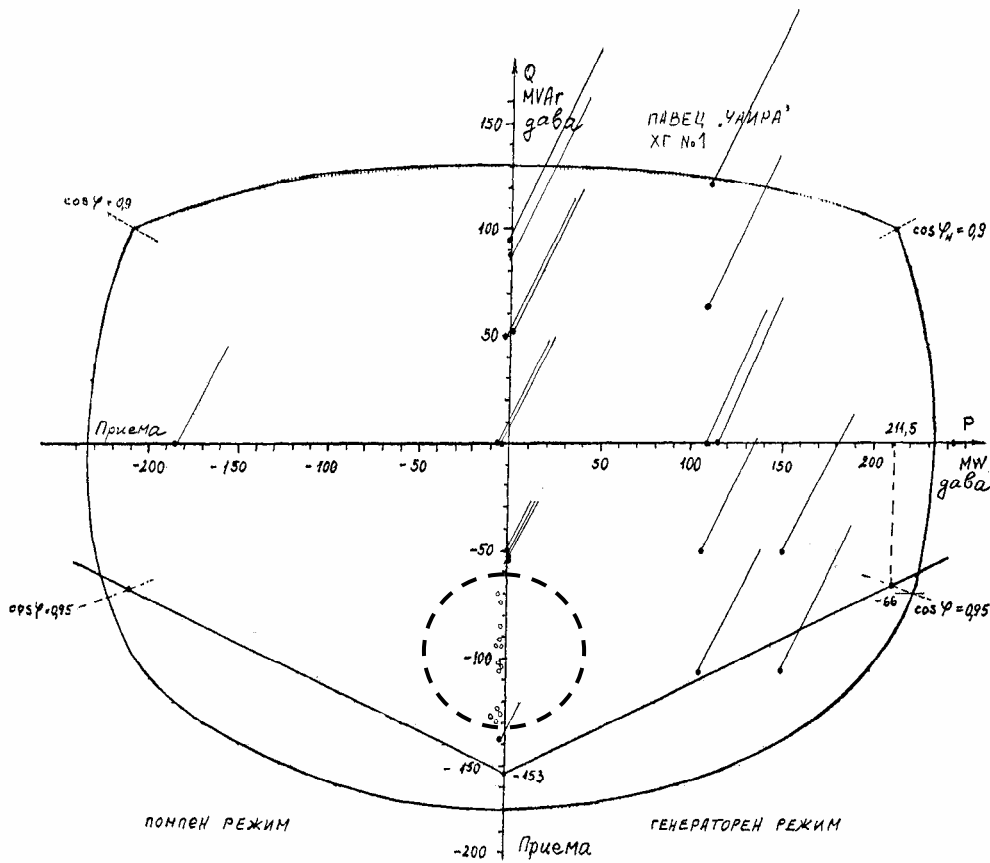
10.3.2. Контролни изпитвания на напреженията на нулева последователност на генераторите в АЕЦ “Козлодуй” – ЕП-2

Регистрирани са и са анализирани: входни величини в измервателните вериги на автоматичното регулиране на възбуждането; напрежение на нулева последователност на изводите на генераторите; напрежение на неутралата на генераторите; напрежение на възбудителен трансформатор. Резултатите потвърждават очакваните съотношения на входните величини на защитите и регулаторите на възбуждане, както и възможните смущения от високочестотните генератори.

10.3.3. Входни величини на земната статорна защита на генераторите в ПАВЕЦ “Чаира”

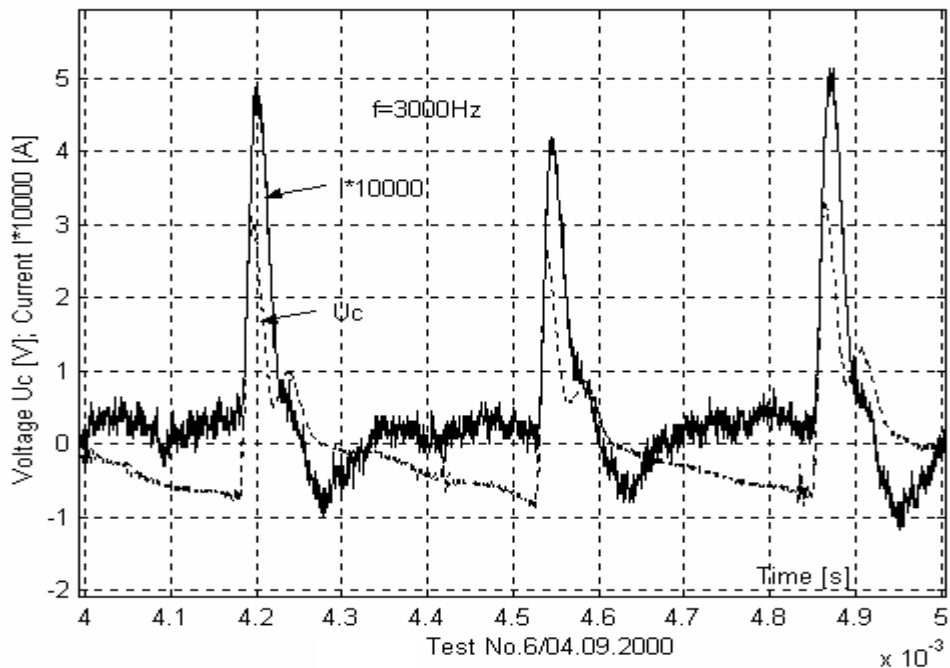
Изследването е проведено за оценка на сигурността на земната статорна защита. Тя има като входна величина нивото на третия хармоник в напрежението на неутралата на генератора (реагира при понижаване) и затова е проведено измерване и регистриране на това напрежение, както и на другите входни величини (фазов ток, фазово напрежение и напрежение на нулевата последователност на изводите на генератора) на земната статорна защита при работа на хидроагрегатите в четирите възможни режима - генератор и помпа, при отдаване и при приемане на реактивна енергия.

На фиг. 10.3.3.1 се посочва мястото на изследваните точки в товаровата диаграма на ХА №1. Точките с ниско ниво на третия хармоник в неутралата $U_N^{(3)}$ (под 0,7V) са групирани в отрицателната област на реактивната компонента на товара, при ниски стойности на активната мощност. Измерените точки са в интервала от -85,7MVA_г до -129,3MVA_г. На фигурата тази област е заградена ориентировъчно с пунктирана линия.



Фиг. 10.3.3.1. ПАВЕЦ "Чаира". Място на изследваните точки в товарната диаграма на ХА №1. В пунктирния кръг са точките с напрежение на третия хармоник в неутралата под настройката на защитата 0,7V.

10.3.4. Входни величини на земната роторна защита на ТГ2 на ТЕЦ "Бобов дол"



Фиг. 10.3.4.1. Опит №6. Ток I и напрежение U_c на релето за 1ms

Регистрирани са и са анализирани входните величини на земната роторна защита на турбогенератор №2 в ТЕЦ "Бобов дол" в режим на нормална експлоатация. Регистрирани са също

токовете, инжектирани във възбудителната верига и позволяващи да се оцени izolацията ѝ спрямо земя.

Входният ток I и входното напрежение U_c на земната роторна защита (тя реагира на големината и посоката на инжектирания ток с честота 50Hz) са показани на фиг. 10.3.4.1.

Системите за високочестотно възбуждане внасят смущения, които в конкретния случай при честота на възбудителния генератор 500Hz и шестфазна схема на изправя-не стават с честота 3000Hz.

Всички входни величини са несинусоидални. Налага се тяхното осцилографиране и последващо числено обработване. Подходящо е използването на програмния продукт Matlab и създадените допълнително M-функции.

11.Глава единадесета. Селективна земна защита

Разработена е нова схема за многокритериална селективна земна защита. Като входни величини се използват напрежението с нулева последователност на шините на подстанцията и токовете с нулева последователност на всеки от изводите, като информацията за тях се събира в общо централно устройство.

11.1. Избор на локални критерии и показатели за пускане на защита и за селективно изключване на извода със земно съединение

11.1.1. Критерии за пускане на защитите

А. Големина на напрежението с нулева последователност. Това е универсален критерий, валиден за всички режими на неутралата и съществува както в преходен, така и в установен режим. Може да се използва независимо от наличието на преходно съпротивление, електрически дъги, хармоници в захранващото напрежение и т.н.

В. Нарастването на напрежението с нулева последователност в преходния процес става по бавно от това на преходния ток. Налага се защитите, които използват като критерий за селективно откриване на повредения извод преходния процес при з.с. да бъдат пускани по големината на първата полуълна на преходния ток на нулева последователност.

С. Съвместното използване на двата посочени критерия за пускане на земната защита гарантира сигурност и чувствителност, независимо от многобройните смущаващи фактори.

11.1.2. Критерии за селективно изключване на извода със земно съединение

Подбрани са критерии, които могат удобно да се реализират след като напрежението на нулева последователност на шините на подстанцията и токовете на нулевата последователност на изводите са преобразувани в цифров вид.

А. Преходният процес при всички режими на неутралата дава ударни стойности за величините $3i_0$ и $3u_0$ с еднакви знаци за повредената линия и с различни за здравите. Този критерий води до сравняване на качество ("знаците съвпадат" или "знаците не съвпадат"), така че чувствителността е абсолютна.

В. Относително сравняване на нивото на висшите хармоници в присъединенията в установения режим на з.с. Токът на нулева последователност на всеки извод се филтрира така, че изходният сигнал да отговаря на сумата от големините на хармониците с номера 5, 7, 11 и 13. Избира се сигналът с най-голямо ниво, който отговаря на извода с повреда чрез последователно сравняване на сигналите на отделните изводи един спрямо друг. Пресмятането на хармониците се провежда върху данните за 60ms, като се пропускат данните за първите 20ms след заработване на пусковите органи.

С. Относително сравняване на нивото на пети хармоник в присъединенията в установения режим на з.с. Избира се сигналът с най-голямо ниво на пети хармоник, който отговаря на извода с повреда чрез последователно сравняване на сигналите на отделните изводи един спрямо

друг. Пресмятането на пети хармоник се провежда върху данните за 60ms, като се пропускат данните за първите 20ms след заработване на пусковите органи.

D. Относително сравняване на нивото на основния хармоник в присъединенията в установения режим на з.с. Избира се сигналът с най-голямо ниво на основния хармоник, който отговаря на извода с повреда, чрез последователно сравняване на сигналите на отделните изводи един спрямо друг. Пресмятането на основния хармоник се провежда върху данните за 60ms, като се пропускат данните за първите 20ms след заработване на пусковите органи.

E. Определяне на посоката на активната компонента на първи хармоник на тока на з.с. в установен режим. Този критерий е специално за компенсираните мрежи, където не може да се разчита на капацитивния ток на з.с. За изолираните мрежи се определя посоката на капацитивната компонента на първи хармоник на тока на з.с. в установен режим.

В таблица 11.1.2.1 се посочва начин за прилагане на посочените критерии за пускане и измерване на земните защиты при всички възможни неефективни начини за заземяване на неутралата.

Табл. 11.1.2.1

Режим на неутралата	Критерии за пускане на защитата	Критерии за изключване
Изолирана неутрала	A, B	A, B*, C*, E
Неутрала, заземена през реактор	A, B	A, B*, C*, E
Неутрала, заземена през резистор	A	D
Неутрала, заземена през резистор и реактор	A, B	A, B
Неутрала, заземена през реактор, като 0,5s след з.с. се включва и резистор	A, B	D

Забележка: B*, C* - означава, че може да се използва един от двата критерия.

11.1.3. Коefициенти на сигурност и чувствителност

Общоприето е коефициентът на сигурност на земните защиты K_C да бъде от 1,2 до 2,0. За коефициента на чувствителност се приема $K_{\text{ч}}=1,5\div 2,0$. Тяхното произведение има минимална стойност

$$(11.1.3.1) \quad (K_C \cdot K_{\text{ч}})_{\min} = 1.2 \cdot 1.5 = 1.8,$$

а максималната е

$$(11.1.3.2) \quad (K_C \cdot K_{\text{ч}})_{\max} = 2.0 \cdot 2.0 = 4.0.$$

Проведените експерименталните изследванията в системата и в лаборатория потвърждават тези съотношения.

Най-ниските обхвати на токовете защиты трябва да започват от един - два ампера първичен ток, а най-високите - до определения от ПУЕУ като максимален за тези мрежи еднофазен ток на з.с. - 500 A.

Ударният ток се пресмята относително спрямо максималната стойност на трайния ток на з.с. с промишлена честота, като не се отчита наличието на компенсация. Минималният ударен коефициент K_Y се приема да бъде $K_Y=5$. Опитите в п/я "Панагюрище" налагат да се приеме много по-ниска минимална стойност $K_Y=1.2$ и тя да се използва при определяне на настройките на защитата.

Сравнението на всички резултати за нивото на в.х. в напрежението при нашите условия позволява да се приеме минимална стойност за в.х. $0.05U_H$. В спектъра на тези хармоници се дава преимущество на 5-ти, но могат да се включат също 7-ми, 11-ти и 13-ти, като се пресмята сумата на ефективните им стойности. Опитите в п/я “Панагюрище” налагат отказване от този критерий. Максималната стойност на в.х. в напрежението е определена като $0,3U_H$.

Небалансираните токове се пресмятат спрямо максималните токове на трифазно к.с. Когато се включва и преходната апериодична компонента, за най-неблагоприятна се приема времеконстантата 20ms, а периодичната и апериодичната компоненти имат еднаква максимална стойност.

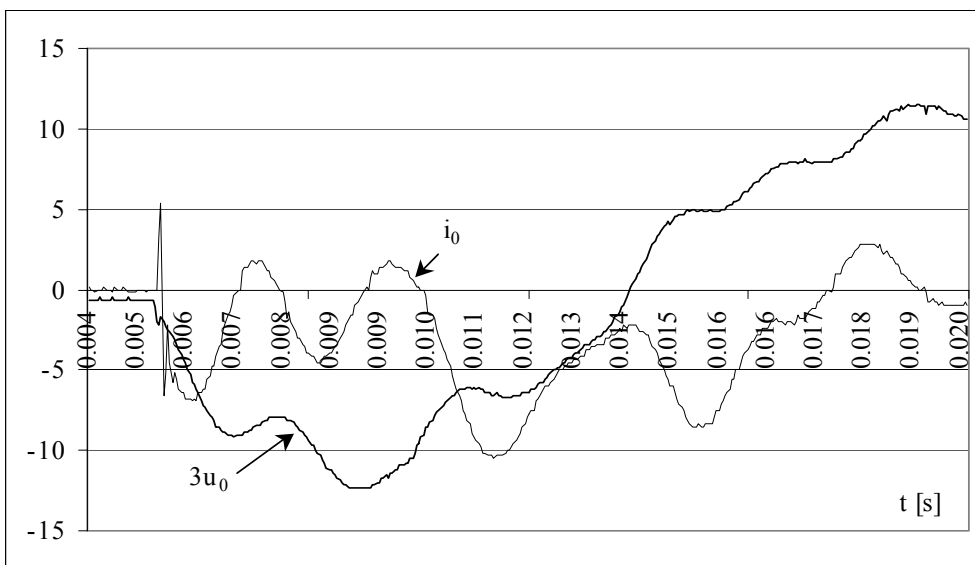
Практически не е възможно да се реализира земна защита с един обхват за всички режими на неутралата, всички нива на висшите хармоници, всички преходни съпротивления в мястото на повредата и т.н.

11.1.4. Типови сигнали за изпитване на защитите

При така избраните критерии типовите сигнали за изпитване на защитата са следните:

Сигнал A_i . Регулируем синусоидален ток. Използува се за: а) Настройване на измервателни органи, които използват като критерий относителното сравняване на големините на установената стойност на тока $3I_0$; б) Проверка на същите органи при действие на небалансирания ток. Този сигнал се получава с товарно устройство.

Сигнал A_u . Регулируемо синусоидално напрежение. Използува се за проверка на пусковия орган, който използва като критерий установената стойност на напрежението $3U_0$. Този сигнал се получава с товарно устройство.



Фиг. 11.1.4.1.

Сигнал A_i . Преходен ток – с възможност за регулиране на амплитудата на първата полувървна и без изисквания за останалата част от процеса (фиг. 11.1.4.1 – от лабораторен модел на мрежа средно напрежение). Използува се за: а) Настройване на пускови органи, които използват като критерий преходния ток $3i_0$; б) Настройване на измервателни органи на преходния ток $3i_0$. Получава се с физически модел на мрежа средно напрежение. Регулира се с промяна на фазовия ъгъл на напрежението в момента на включване.

Сигнал V_u . Преходно напрежение – условията са както при сигнала V_i .

Сигнал C_i . Несинусоидален ток. Използува се за настройване на измервателни органи на защити, които реагират на в.х. Получава се с физически модел на мрежа средно напрежение. Регулирането се осъществява с промяна на параметрите на модела. За контрол на в.х., отговарящи на изискванията на земните защити, се използва един допълнителен филтър за в.х. със същите параметри, каквито има филтърът на изпитваната защита и на изхода му се включва подходящ товар и измервателна апаратура. По-прост вариант е директно след честотния филтър на изпитваното реле да се включи устройство за измерване на тока.

Честотният филтър се оценява конкретно. Той може да отсява хармониците от втори до четиридесети, само пети, от пети до тринадесети и др.

Сигнал C_i . Несинусоидално напрежение – условията са както при сигнала C_i .

Сигнал D_i . Преходен синусоидален ток с аperiодична компонента. Използува се за проверка на измервателни органи при действие на небалансирани токове. Получава се с физически модел на мрежа високо напрежение. Регулирането се осъществява с промяна на параметрите на модела или с промяна на фазовия ъгъл на напрежението при включване.

Сигнал D_u . Преходно напрежение с аperiодична компонента – условията са както при сигнала D_i .

11.2. Входен преобразовател

Входният ток с нулева последователност се оценява по два показателя - първа по-лувълна на преходния ток и големина на висшите хармоници в тока. Разчита се на цифрово филтриране от едночипов микроконтролер.

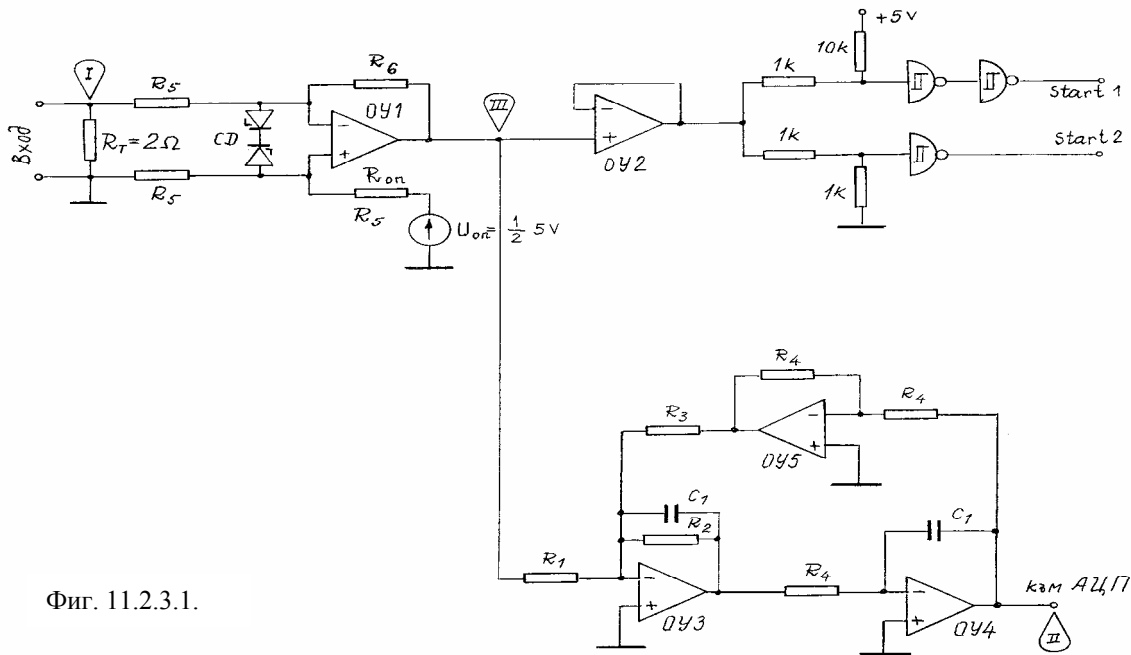
Условията за дискретизация на входните сигнали се определят от спектъра на висшите хармоници, които са характерни за з.с. в разглежданите мрежи. Предвиждат се за използване хармониците с номера 5, 7, 11 и 13. При основна честота 50Hz честотата на сканиране трябва да бъде поне 1300Hz. Приема се честотата 1600Hz и се създава запас от $1600/1300 = 1,23$.

Експертно и на базата на опита на катедра "Електроенергетика" от ТУ - София по внедряване на микропроцесорни устройства в енергетиката се предвижда използване на 8 битов едночипов микроконтролер с вграден 10 разряден АЦП. Минималният динамичен диапазон на измерване е 25.

11.2.1. Електрическа схема на входен преобразовател

Във входа на разглежданата електрическа схема (фиг. 11.2.3.1) постъпват два вида входни сигнали:

- А. Ток на нулевата последователност, получен от ТТФ или от 3 паралелно свързани ТТ, които имат като вторичен товар резистор $R_{i,вх}$. Стойността на $R_{i,вх}$ включва и съпротивлението на съединителните проводници и трябва да гарантира оптимални условия за работа на ТТ, а това зависи от типа на ТТ, броя и типа на кабелите при ТТФ и допустимото входно напрежение на първия операционен усилвател OVI (обикновено до 5V). Ориентировъчно $R_T = 1 \div 2 \Omega$ и може да се определи точно за всеки конкретен случай.
- В. Напрежение на нулева последователност - получава се от петбедрен напрежителен трансформатор или от схема "отворен триъгълник". В този случай $R_{вх}$ се изпълнява като делител (например $5000\Omega/100\Omega$), чието максимално вторично напрежение трябва да бъде също такава, каквото е в токовата верига - до 5V.



Фиг. 11.2.3.1.

Изходът на *OY1* е свързан един път към схемата на АЦП и втори път - към друг операционен усилвател *OY2*, който се използва за определяне на знака на първата полуwave на тока и на напрежението при з.с. *OY2* е предвиден да се използва и за настройване на величината на заработване на пусковия орган.

Нискочестотният филтър за 800Hz има честотата на срязване $\omega_c = 2.3, 14.800 \text{ Hz} = 5024 \text{ s}^{-1}$. Други приети изисквания са: неравномерност на предаване - 3dB; коефициент на усилване - 1; дължина на преходната лента - 400÷800Hz. Те се изпълняват от биквадратни НЧФ от втори порядък с апроксимация по Чебишев.

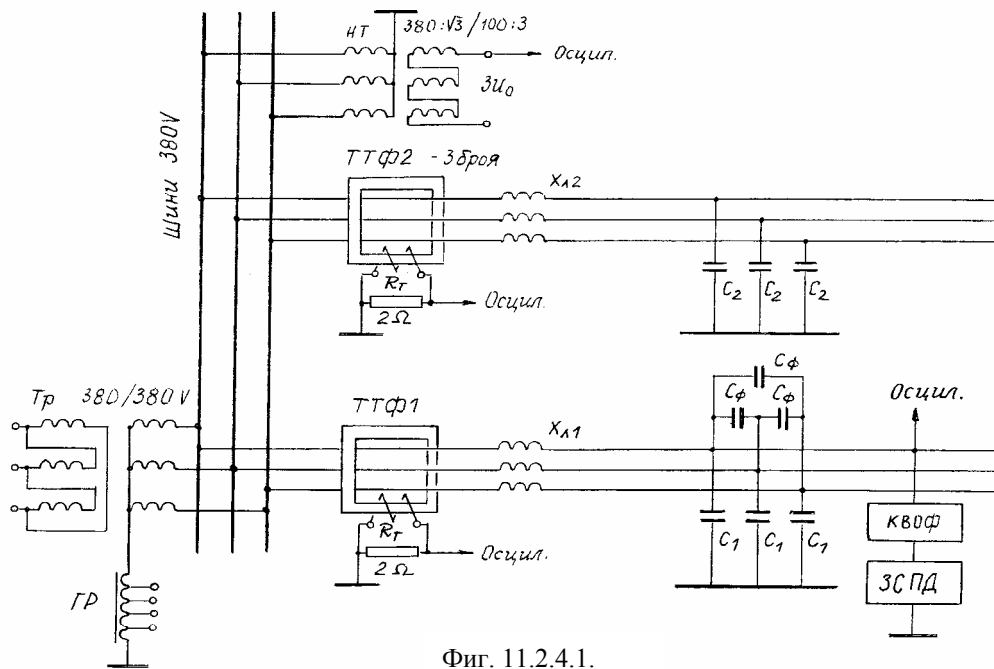
11.2.2. Изпитване на входния преобразовател

Изпитването е проведено в лабораторията "Релейна защита" на ТУ-София.

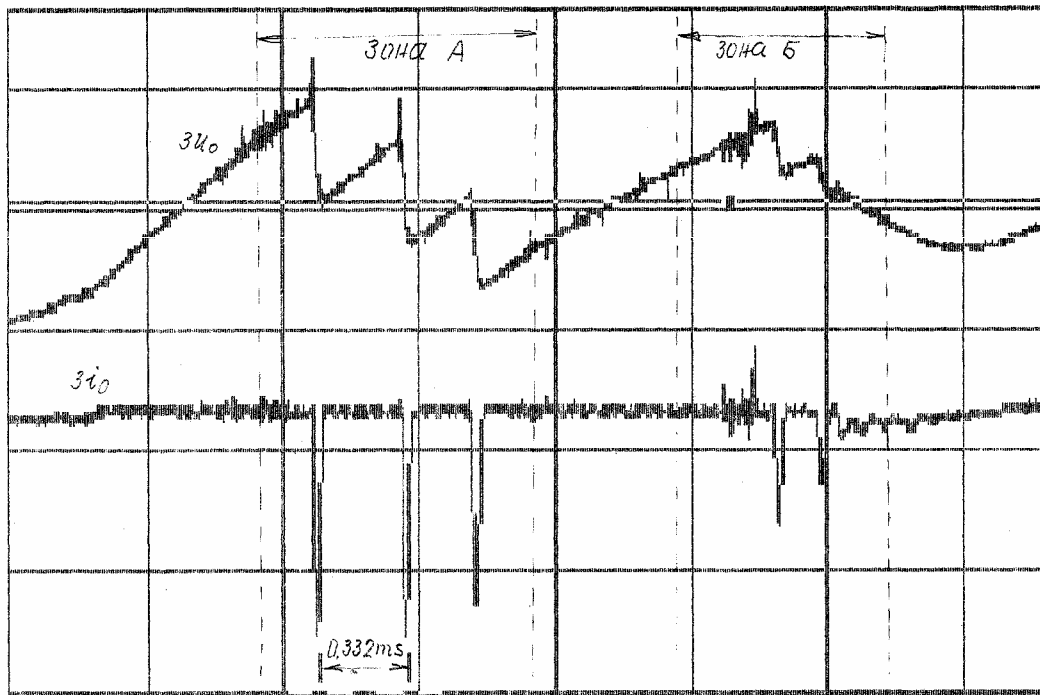
А. Схема на опитната постановка (фиг. 11.2.4.1)

Трансформаторът Тр 380/380V е модел на силов трансформатор 110/20kV, има изведена неутрала и служи за симулиране на различни режими на неутралата. В случая има свързан модел на ГР с изводи, за да се създават различни степени на компенсация на земните токове. Изкуствено създадената шинна система 380V има напрежителен трансформатор с намотка в отворен триъгълник и преводно отношение $380:\sqrt{3}/100:3 \text{ V}$. ТТФ са реални. Един е поставен на линията с повреда, а три - на неповредената линия, за да се симулират общо четири електропровода с една повреда към "земя". Електро-проводите са представени с надлъжни индуктивности и капацитети към "земя" (по 4μF на фаза), като на линията с повреда са поставени и междуфазни капацитети (по 1μF на фаза). З.с. се реализира с ключ за включване в определена фаза (КВОФ) и по желание през устройство за имитиране на з.с. през прекъсваща дъга (ЗСПД).

Токовете и напреженията се регистрират с цифров осцилоскоп, свързан към персонален компютър. Софтуерът към осцилоскопа и програми в Matlab дават възможност за лесно регистриране, обработване и разпечатване на резултатите от експериментите.



Фиг. 11.2.4.1.



Фиг. 11.2.7.1. Земно съединение при прекъсваща дъга. Лабораторно симулиране

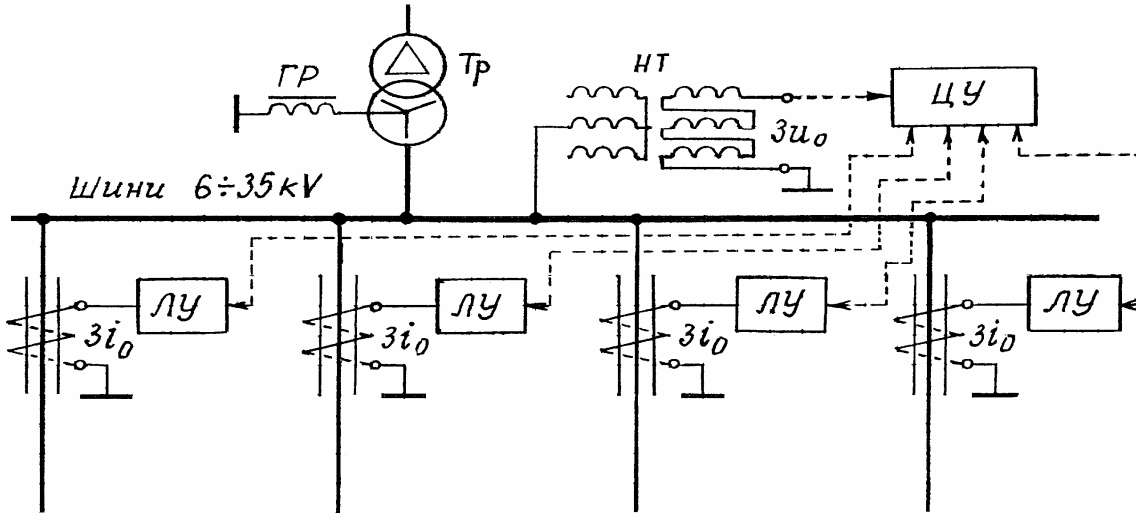
Входните величини $u(t)$ и $i(t)$ за изпитване са подбрани от типичните сигнали (т. 11.1.4). От многобройните изпитания на защитата тук е показан като пример един запис на ток и напрежение, който илюстрира изключителната сложност и разнообразие на явлението при прекъсваща дъга (фиг. 11.2.7.1). Записани са 3,5ms от явлението. Виждат се няколко типични пробива на интервал от 0,332ms (зона А) и интервал 0,162ms (зона Б). Характерното е, че знакът на тока съвпада със знака на градиента на напрежението, а не със знака на самото напрежение. Тази констатация усложнява

алгоритъма за пускане на защитата при з.с. през прекъсваща дъга и прави още по-наложително използването на знака именно на първата полуълна на тока и на напрежението.

11.3. Схема и алгоритъм на многокритериална цифрова земна защита

Предлага се алгоритъм, който определя селективно извода със з.с. по няколко различни критерии, като се разчита на относителното им сравняване, вместо сравняването им с константни величини на заработване.

Предвижда се в подстанцията да има по едно локално устройство (ЛУ) за всеки извод и едно общо централно устройство (ЦУ) за цялата шинна система (фиг. 11.3.2.1).

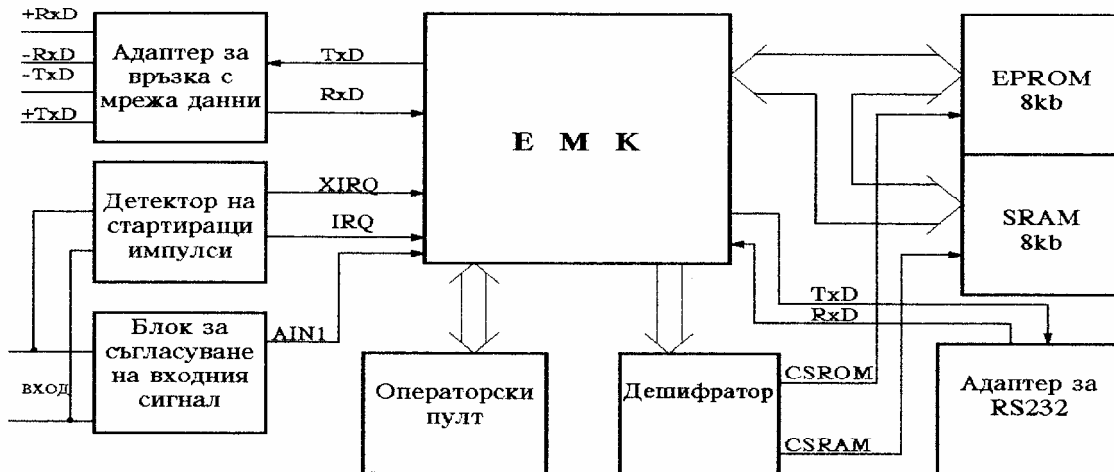


Фиг. 11.3.2.1. Разположение на централното устройство ЦУ и на локалните устройства ЛУ в примерна подстанция с 4 извода

11.3.2. Описание на блоковата схема на ЛУ и ЦУ (фиг. 11.3.2.2)

"ЕМК" - едночипов микроконтролер, например тип МС68НС11G5 на Motorola.

"Блок за съгласуване на входния сигнал" - обхваща: резисторен преобразовател "ток-напрежение", ограничител от ценер-диоди; операционен усилвател; източник на опорно напрежение $U_{оп}$, равно на половината от допустимото входно напрежение (5V); нискочестотен филтър (ФНЧ) за 800Hz.



Фиг. 11.3.2.2. Блокова схема на централно и локално устройство

"Детектор на стартиращи импулси" - при входна величина с положителен знак сигналът, означен като *Start 1*, изпреварва сигнал *Start 2*, а при отрицателен е обратното.

"Адаптер за връзка с мрежа данни" и "Адаптер за RS232"

"Операторски пулт" - дисплей и клавиатура

"EPROM - 8kb" - Служи за записване на програмата.

"SRAM - 8kb" - Служи за оперативна памет.

11.3.3. Задачи на локалното устройство (ЛУ):

- Контролира нивото на тока с нулева последователност. Стартира се, когато първичният ток превиши 10А. След стартиране ЛУ изчаква 20ms в стартирано положение, независимо от промените в токовия сигнал, преди да се започне действието на АЦП и хармоничният анализ.
- Определя знака на първата полувълна на преходния ток.
- Измерва в продължение на три последователни периода $3.32=96$ точки. Започва 20ms след старта и измерва до 80-тата милисекунда.
- Провежда хармоничен анализ, като пресмята хармониците с номера 1, 5, 7, 11, 13 и сумата от висшите хармоници.
- След приключване на хармоничния анализ преминава в режим на дежурство, докато не бъде разпитано от централното устройство или не изтече времето от 2 s след старта.
- При запитване от ЦУ: изпраща записаната информация; преминава в режим на дежурство до получаване на сигнал за изключване или за деблокиране ; деблокира се и чака появата на ново з.с.

11.3.4. Задачи на централното устройство (ЦУ):

- Контролира непрекъснато нивото на напрежението с нулева последователност на шините (фиг. 11.3.2.1) и заработва, когато това напрежение надвиши 40V.
- Дежури задължително 2s след всяко пускане.
- Определя знака на първата полувълна на преходното напрежение.
- Изпраща импулси за разпитване на ЛУ, след като са изтекли 145ms от момента на пускането.
- Разпитва ЛУ на всички изводи. За 20 извода времето за разпитване е до 1s.
- Анализира информацията по предвидения алгоритъм и приоритети и взема решение за изключване или деблокиране.
- Изпраща сигнали на по-високото ниво, например в диспечерски пункт.
- Регистрира данните от всяка повреда.
- Има готовност да бъде разпитвано откън.

В глава дванадесета са дадени изводи от част трета "Входни величини на земни защиты в разпределителни мрежи".

Част четвърта. Моделиране на входните величини за защита при загуба на възбуждане на синхронни генератори

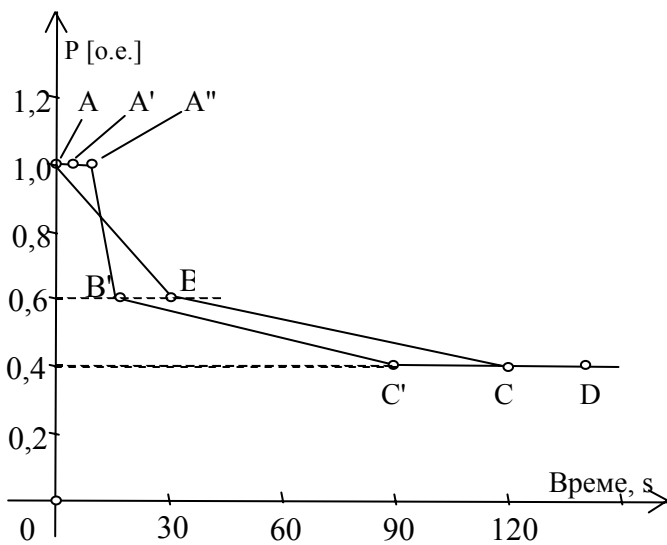
13. Глава тринадесета. Специфични модели на синхронен генератор тип ТВВ-220-2А за определяне на токовете и напреженията при загуба на възбуждане и резултати от изчисления

В основата на моделите на синхронен генератор (СГ) е заложена схема на проста ЕЕС, където генераторът е включен през съпротивление X_c към шини с безкрайна мощност ($U=\text{const}$). Прилага се общоприетата идеализация на синхронната машина, а именно: ненаситена синхронна машина, пълна симетрия на статорните намотки и синусоидално разпределение на ЕДН във въздушната междина. Отчита се влиянието на демпфериращото действие на масивното тяло на ротора и системата за регулиране на мощността на турбината (АРС). Реалният успокоителен контур е представен чрез две демпферни намотки, съответно по надлъжната и напречна ос. За базисна система е приета взаимната система относителни единици.

Разработени са пълен и опростен математически модели на СГ, които са основани съответно на пълна система диференциални уравнения на Парк и опростена система диференциални уравнения. Разликата между числените резултати, получени по двата модела е по-малка от 1%.

Параметрите на генератора тип ТВВ-220-2А, необходими за съставяне на математическите модели са получени от фирмата-производител и чрез изчисление.

Инструкцията за експлоатация на разглеждания СГ, представена от АО "Электросила" [Паспорт ОБС.460.248.ТО] определя възможността от използване на асинхронен режим при загуба на възбуждане (АРЗВ) в течение на 15min, като активната мощност се намалява до 60% от номиналната в първите 30s и до 40% - през следващите 90s (фиг. 13.2.3).



Фиг. 13.2.3. Време-диаграма на разтоварване на ТГ при АРЗВ

При АРЗВ е от решаващо значение бързо разтоварване на СГ, преди хлъзгането да е достигнало критичното. По тези причини в изследванията се приема, че разтоварването на СГ до мощност $0,6P_H$ става с помощта на блока за релейно разтоварване (БРР) за време 2s. Разтоварването на СГ до мощност $0,4P_H$ през следващите 90s се извършва от автоматичния регулатор на скоростта (АРС).

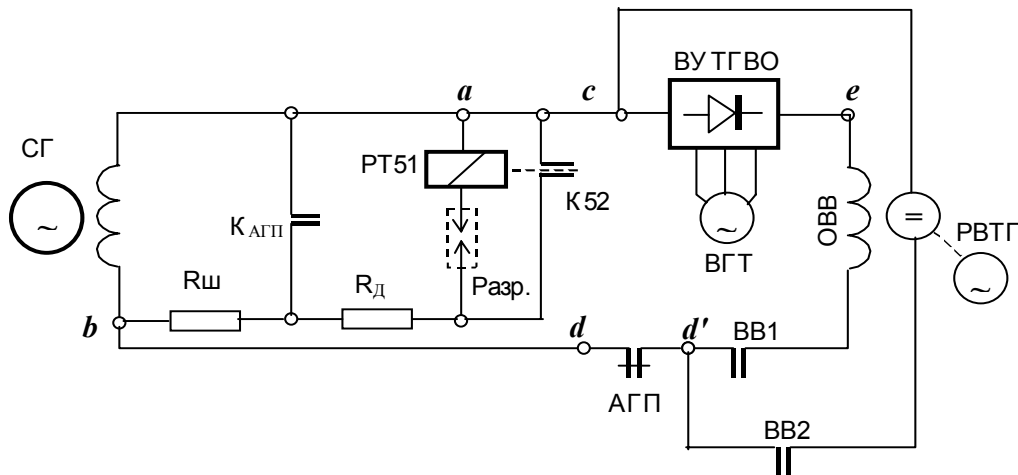
Характеристиката ABCD (фиг. 13.2.3) отговаря на заводските предписания. Приетият в изследването основен режим на работа е означен на фигурата с $A'B'C'D$. Означените на фигурата точки определят следните интервали: $t_{AA'}$ - време за установяване на АРЗВ; $t_{A'A''}$ - време между отварянето на контакта АГП и затварянето на

контакта $K_{АГП}$ (фиг. 13.2.4); $t_{A'B'}$ - време за релейно разтоварване до мощност $0,6P_H$; $t_{B'C'}$ - време за разтоварване от мощност $0,6P_H$ до мощност $0,4P_H$.

Изследвани са пет вида асинхронни режима със загуба на възбуждане: А, Б, В, Г и Д. За всеки от тях са разгледани измененията на следните величини:

- $U(t)$; $I(t)$; $I_d(t)$; $P(t)$; $Q(t)$; $s(t)$; P, jQ диаграма на СГ.

- R, jX диаграма или ходограф на импеданса на СГ. По нея се определя моментът $t_{\text{вх}}$ на попадане на ходографа в типична характеристика на заработване на устройството за улавяне на асинхронен режим (УУАР), прилагана в практиката.



Фиг. 13.2.4. Принципна схема на АГП на генератор тип ТВВ-220-2А

Режим А

- Лъжливо изключване на АГП или друго прекъсване на възбудителния контур по веригата **a-c-e-d-b** (фиг. 13.2.4).
- Шунтиране след време 1s на възбудителната намотка (в.н.) от съпротивлението $R_{\text{ш}}$.
- Разтоварване на СГ до мощност $0,6P_{\text{н}}$.

Режим Б

Прекъсване на възбудителната верига между точки **a** и **b** и работа на турбогенератора с отворена възбудителна намотка.

Режим В

- Късо съединение във възбудителната верига между точки **c** и **d'**.
- Изключване на АГП със закъснение 1s и шунтиране на възбудителната намотка чрез съпротивлението $R_{\text{ш}}$.
- Разтоварване на СГ до мощност $0,6P_{\text{н}}$.

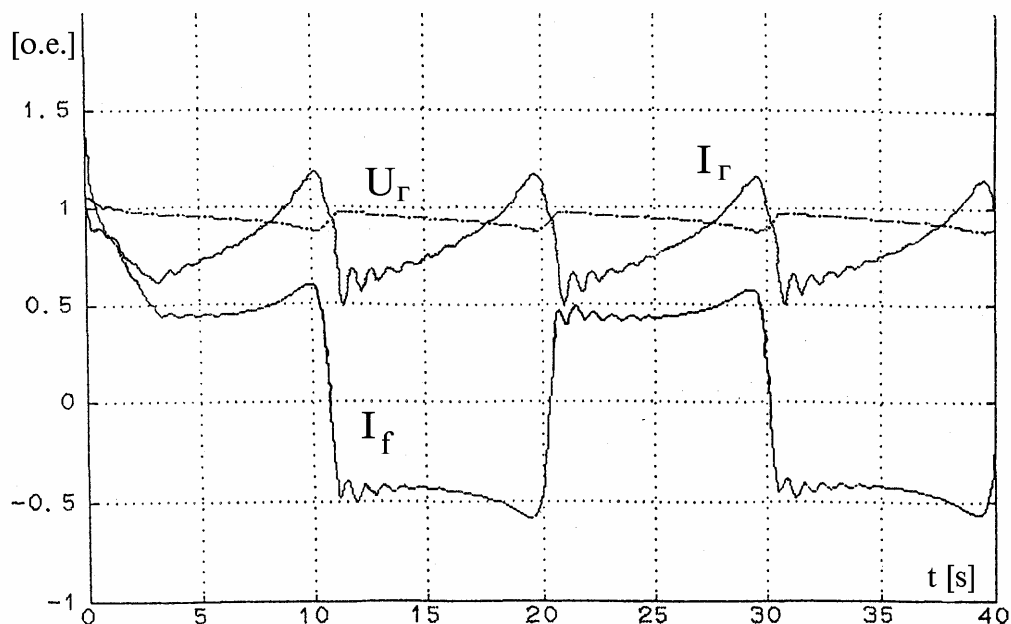
Режим Г

- Късо съединение във възбудителната верига между точки **a** и **b** и работа на СГ с накъсо съединена възбудителна намотка; разтоварване до мощност $0,6P_{\text{н}}$.

Резултати от изследването на режим **Г** са показани като пример на табл. 13.3.1.4 и фиг. 13.3.1.4.

Табл. 13.3.1.4

Изследвана величина	Макс. стойност	Мин. стойност
Активна мощност, P_{Γ} [о.е.]	0.70	0.35
Реактивна мощност, Q_{Γ} [о.е.]	-1.00	-0.266
Пълен ток на статора, I_{Γ} [о.е.]	1.17	0.50
Напрежение на генератора, U_{Γ} [о.е.]	0.98	0.89
Ток на ротора, I_f [о.е.]	0.57	0.57
Хлъзгане, s [%]	0.52	0.05
Измервано съпротивление R_{Γ} , [о.е.]	1.75	0.25
Измервано съпротивление X_{Γ} , [о.е.]	-1.11	-0.50
Време, $t_{\text{вх}}$ [s]	2.83	



Фиг. 13.3.1.4. Напрежение U_g , ток I_g и възбудителен ток I_f . Режим Г.

Режим Д

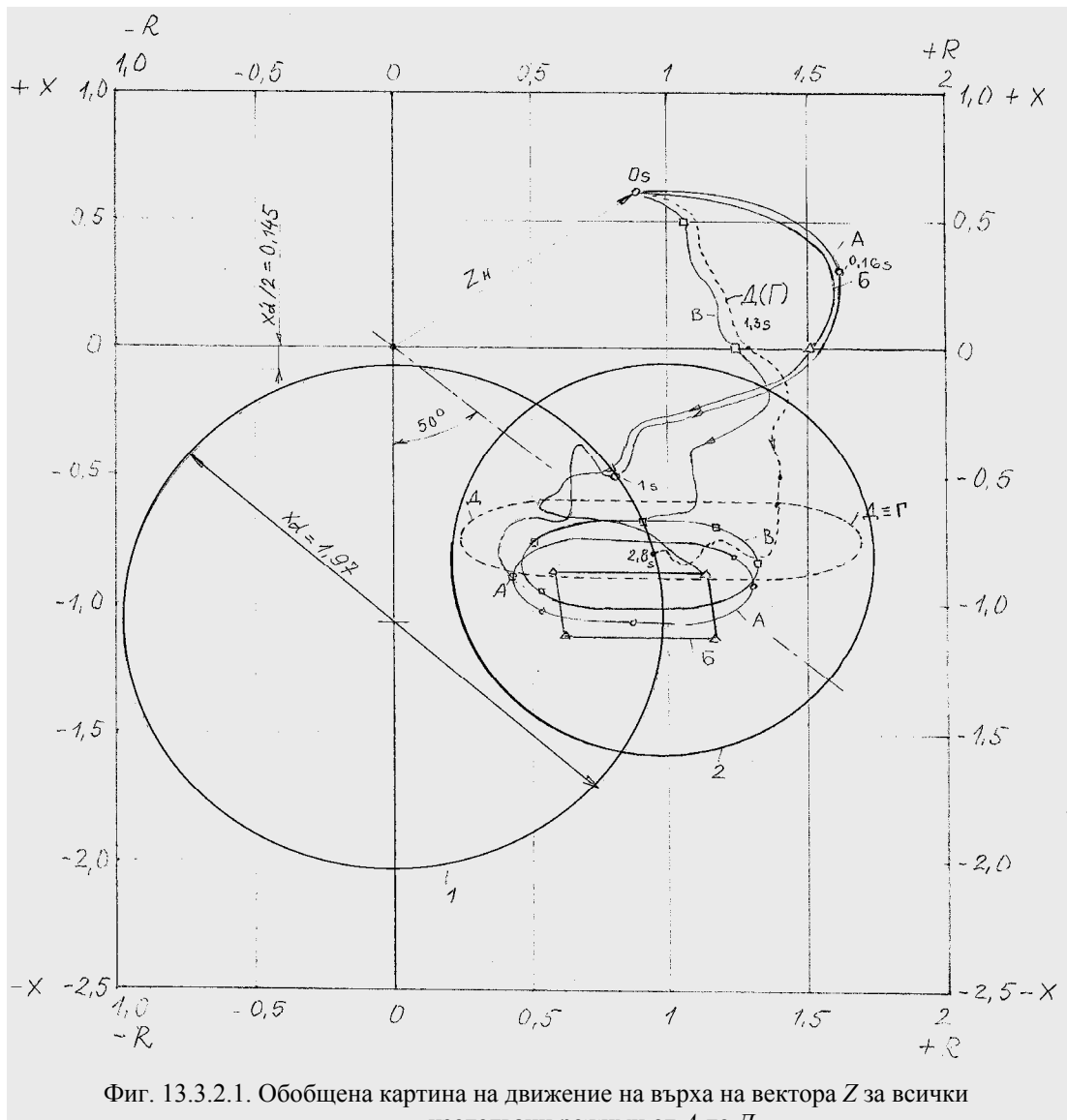
- Работа на СГ с нормално осъществена възбудителна верига, но при липса на напрежение от възбудител на турбогенератора (ВГТ) към възбудително устройство на турбогенератора с водно охлаждане (ВУТГВО).
- разтоварване на СГ до мощност $0,6P_H$

На фиг. 13.3.2.1 е показана обобщена картина на движение на върха на вектора Z , изчислен от тока и напрежението на изводите на генератора, за всички изследвани режими от А до Д. На същата фигура с окръжност 1 е означена характеристиката на традиционната защитата при загуба на възбуждане, а окръжност 2 отговаря на нова предложена характеристика на УУАР.

Допълнително за режим А са проведени аналитични изследвания на ходографа на импеданса $Z(t)$, като се променя режимът на товара:

- a) АРЗВ без разтоварване на СГ, когато изходните режими са гранични точки от диаграмата на допустимите товари. От диаграмата на мощността може да се получи ходографът на импеданса Z при изменение на товара на генератора в съответствие с допустимите стойности в областта на превъзбуждане и недовъзбуждане.
- b) АРЗВ без разтоварване на СГ при малка изходна активна мощност ($\approx 100\text{MW}$) и при превъзбуждане и недовъзбуждане на синхронната машина.
- c) АРЗВ при различен товар в изходен режим. Изследваните режими са с изходни товари от P_H до $0,4P_H$ със стъпка $0,1P_H$ и номинален фактор на мощността.
- d) АРЗВ при различна скорост на понижаване на товара на СГ. Направени са изследвания на три режима, които имат еднакви изходни условия, но се различават по начина на разтоварване на СГ:
 - Генераторът преминава в АРЗВ, без да бъде разтоварен.
 - Разтоварването на турбоагрегата започва след третата секунда и след $7,2\text{s}$ товарът на генератора намалява от P_H до $0,4P_H$. Такава скорост на разтоварване се постига, ако регулиращите клапани на турбината (АРК) се затварят напълно от крайно отворено положение за 12s .
 - Разтоварването на турбоагрегата започва след третата секунда и след 36s товарът на генератора намалява от P_H до $0,4P_H$. Такава скорост на разтоварване се постига, ако регулира-

шите клапани на турбината АРК се затварят напълно от крайно отворено положение за 60s.



Фиг. 13.3.2.1. Обобщена картина на движение на върха на вектора Z за всички изследвани режими от А до Д

е) АРЗВ при промяна на импеданса на връзка със системата. Базисните изследвания са изпълнени при импеданс на на блочния трансформатор $X_{\text{тр}}=0,114$ о.е. Допълнително са разгледани три случая, при които съпротивлението на системата се увеличава с 0,10; 0,26 и 0,45о.е.

14. Глава четиринадесета. Алгоритъм на защита при загуба на възбуждане на турбогенератор ТВВ-220-2А

14.1. Анализ на входните величини за защитата

Изследваните голям брой варианти на входни величини при различни АРЗВ на генератора тип ТВВ-220-2А водят до следното обобщение:

- Максималното хлъзгане, получено в разгледаните АРЗВ (режими от А до Д) е по-малко от критичното $s_{\text{кр}}=1,5\%$.
- Изменението на статорния ток в разгледаните АРЗВ е в границите на $(0,5 \div 1,18)I_{\text{н}}$.
- Понижението на напрежението на изводите на СГ е от порядъка на $6 \div 10\%$ от номиналното.

- d) Максимални стойности на е.д.н., индукираното във в.н. се получават при АРЗВ с в.н., затворена през диодите на ВУТГВО. Ако не се отчита влиянието на R-C контура, шунтиращ диодите, по-продължителните е.д.н. имат амплитуда 932V, като в момента на прекъсване на възбудителния ток I_f се достигат моментни стойности 1865V и дори 3300V при $U_H=400V$. При отчитане на влиянието на R-C контура, шунтиращ диодите, максималните значения на е.д.н. не надвишават U_{fn} .
- e) Изменението на възбудителния ток в разгледаните АРЗВ е в границите на $0,1 \div 0,52$ о.е. или $181 \div 932A$.
- f) Консумираната реактивна мощност от системата е най-голяма в АРЗВ с в.н., свързана накъсо или през диодите на ВУТГВО (256MVA_r). В това отношение най-благоприятен е режимът с в.н., която първоначално е отворена и после се шунтира през съпротивлението $R_{ш}$.
- g) Индуктивното съпротивление X на изводите на генератора се изменя в границите $0,6 \div 1,23$ о.е. Най-голяма стойност $X=1,23$ о.е. се получава при АРЗВ с отворена в.н. При разтоварване на ТГ ходографът на импеданса се измества към по-големите положителни стойности на активното съпротивление R и по-големите отрицателни стойности на индуктивното съпротивление X .
- h) Времето за влизане на ходографа на импеданса $Z(t)$ в кръговата характеристика на УУАР е в границите от 0,95 до 2,83s.
- i) Областта на движение на ходографа на импеданса $Z(t)$ на фиг. 14.1.2 е определена посредством анализ на всички разглеждани режими по следния начин:
- За построяване на многоъгълника α са взети най-външните точки при анализ на базовите режими от А до Д. Те дават и най-дясната точка по оста R от ходографа $Z(t)$ за всички разглеждани режими.
 - За построяване на многоъгълниците β и γ са взети най-външните точки на ходографа $Z(t)$, ако се променят изходните състояния на СГ по характеристиката на мощността преди преминаване в АРЗВ. Най-ниските точки, отговарящи на товар $0,2P_H$, са нереални и затова са отделени в самостоятелен многоъгълник γ .
 - С построяване на многоъгълника δ (намаляване на товара от P_H до $0,4P_H$ със стъпка $0,1P_H$) се формират най-близките до абцисната ос точки на областта.
 - За случаите на различна скорост на разтоварване на СГ и различни реактанси на връзката с ЕЕС многоъгълници не са показани, защото се вписват във вече очертаните области.

АРЗВ се изследва и в равнината на проводимостите Y. Това позволява лесно да се оцени доколко избраната характеристика на УУАР е отстроена от режими на дълбоки синхронни люлеения.

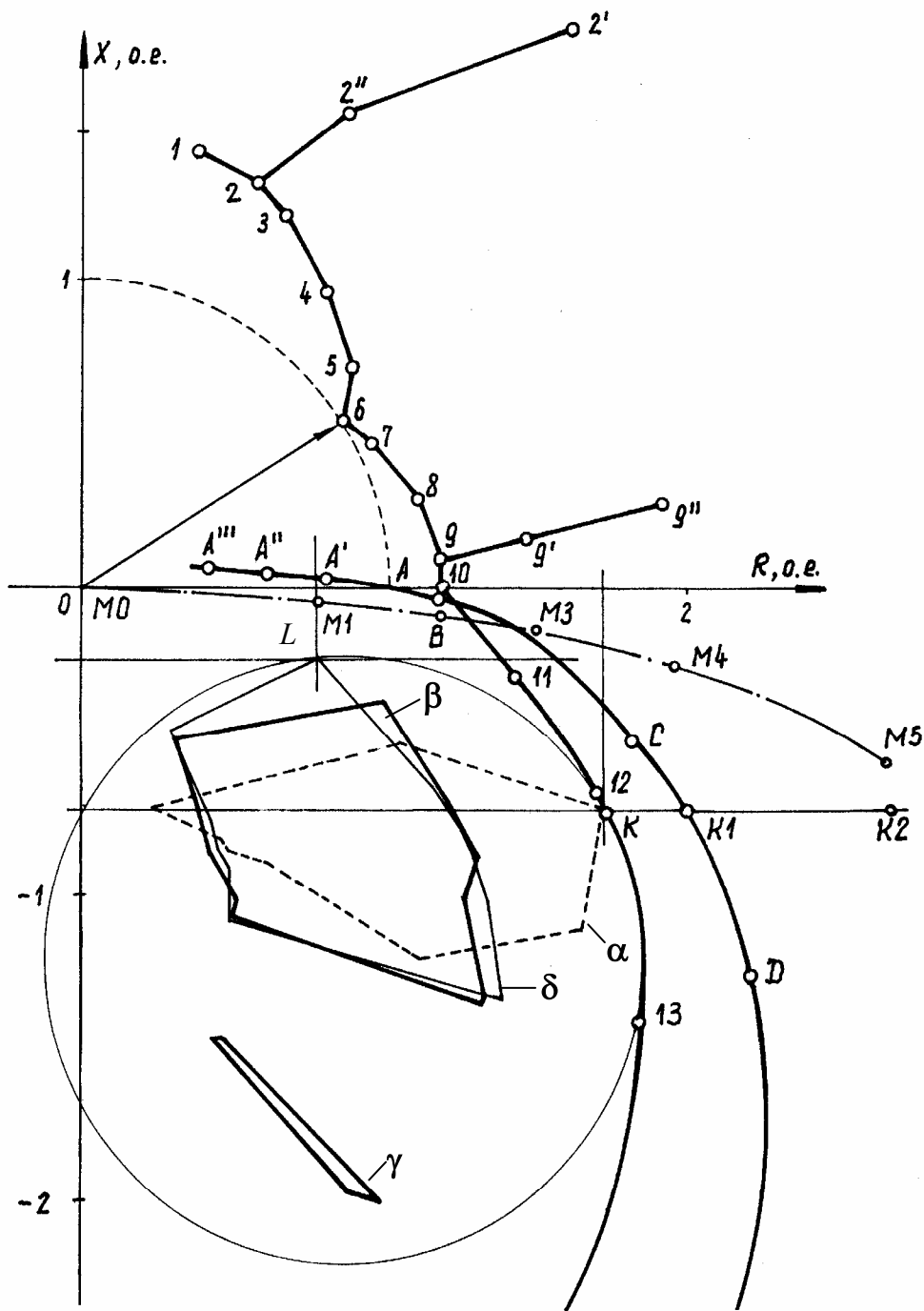
14.2. Избор на характеристика на защитата при АРЗВ

14.2.1. Характеристика и настройка на посочно пусково реле

Функциите на пусков орган при АРЗВ се изпълняват от реле за реактивна мощност. То също сигнализира при граничен или недопустим режим на недовъзбуждане.

Изследването показва, че характеристиката на пусковото реле за ТВВ-220-2А трябва да отговаря на следните изисквания:

- a) Да лежи в трети и четвърти квадрант на равнината P-Q. Ако навлезе в други квадранти, това да става извън обхвата на диаграмата на мощността на ТВВ-220-2.
- b) Да не пречи на използването на СГ в допустимата област на недовъзбуждане, т.е. там да действа на сигнал.
- c) Сигурността на релето да се изчислява спрямо областта на нормална работа на ТГ, която обхваща:



Фиг. 14.1.2. Обобщени резултати от анализа на режимите в равнината Z

- активна мощност от 70MW (минимален активен товар, при който СГ може да работи неограничено време) до 242MW (при 10% допустимо претоварване по активна мощност);
- реактивна мощност от 20MW (минимален реактивен товар, при който е допускатима неограничена по време работа на СГ) до номиналния реактивен товар $136,4\text{MVA}_r = 0,527$ о.е.

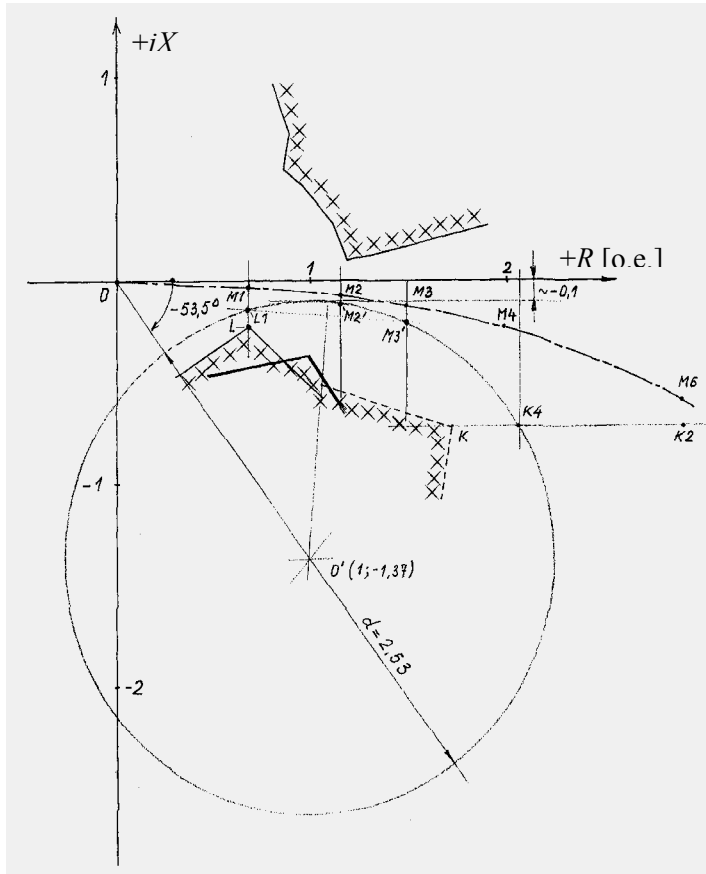
d) Чувствителността на релето да се изчислява спрямо най-близката област на АРЗВ.

Спазването на тези условия води до характеристика на посочното реле в равнината $P-Q$, определена от правата $S_{зр} = 0,215$ о.е. и ъгъл $\varphi = 80^\circ$. В равнината $R-X$ на фиг. 14.1.2 и 14.2.1.2 съответстващата линия е очертана от точки M .

14.2.2. Характеристика и настройка на УУАР

УУАР трябва да отговаря на следните изисквания:

- a) Да обхваща всички полета, където се движи ходографът $Z(t)$ при установен АРЗВ.
 b) Да има чувствителност $K_C \geq 1,5$ спрямо границите на тези полета.
 c) Да бъде отстроена с коефициент $K_C \geq 1,2$ от характеристиката на пусковото реле.



Фиг 14.2.1.2. Диаграма за определяне на пусковите условия

- d) Да има минимална площ, за да ограничи възможността от заработване при преходни и други ненормални режими.
 e) Да няма точки в област-та на положителните ре-актанси X .

Описаните изисквания се изпълняват от устройство с кръгова характеристика на заработване, построена под характеристиката на посочното реле (точки M) и над критичните точки от област-та на движение на ходографа $Z(t)$, каквито са т. L и K (дѐа. 14.2.1.2). Коефициентите на сигурност и чувствителност се пресмятат един път по отношение на оста R и втори път по отношение на X . Получени са контролни точки L_1 , M_2' , M_3' и K_4 и окръжност с център $O'(R=1,0; -X=-1,37 \text{ о.е.})$; диаметър $d=2,53 \text{ о.е.}$; $-0,1 \text{ о.е.}$ изместване по оста R ; $-53,5^\circ$ отклонение на центъра спрямо оста R .

14.4. Алгоритъм за цифрова защита при асинхронен режим на СГ и загуба на възбуждане.

За изпълнение на пусковите и измервателни функции защитата се нуждае от следната входни величини: един фазен генераторен ток; едно фазно генераторно напрежение; напрежение на нулева последователност на изводите на СГ.

Разрядността на АЦП се определя в зависимост от големината на грешката при квантоване по ниво и големина на грешката по фаза.

Ако тежестта на най-младшия бит е 1% от амплитудата на сигнала, то размерността на АЦП трябва да бъде по-голяма от 7 бита. Ако времето за преобразуване е $30 \mu s$ ($\Delta\varphi=0,5^\circ$), то разрядността на АЦП трябва също да бъде по-голяма от 7 бита.

14.4.3. Пускова характеристика

Пусковото посочно реле се реализира по условието:

$$(14.4.3.1) \quad \left| \begin{array}{l} 0 \leq \arg \frac{i}{u} \leq \pi \quad ; \\ 0 \leq \varphi_i - \varphi_u \leq \pi. \end{array} \right.$$

Входните величини i и u са вектори и може да се запише:

$$(14.4.3.2) \quad \arg \frac{I(k)}{U(k)} = \arg \{i(k)u(k) - i(k-m)u(k-m) - [i(k-m)u(k) + i(k)u(k-m)] \cos \beta + j[i(k-m)u(k) - i(k)u(k-m)] \sin \beta\} = \arg(P + jQ).$$

С k са означени отделните дискрети на измерваната величина. Числените стойности на коефициентите в (14.4.3.2) са $A=1,307$, $B=1,414$ и $C=0,541$.

14.4.4. Изчисляване на импеданса

Изчисляването на импеданса на изводите на СГ трябва да става по три метода, като при всеки от методите се проверява дали се попада в зоната на заработване. Решението за заработване на УУАР се взема на базата на мажоритарен принцип.

Първият метод използва фундаменталните стойности на сигнала, получени посредством преобразуването на Хартли:

$$(14.4.4.1) \quad R = \frac{uk\hat{i}_k - \hat{u}_k\hat{i}_k}{i_k^2 + \hat{i}_k^2}; \quad X = \frac{\hat{u}_k\hat{i}_k - uk\hat{i}_k}{i_k^2 + \hat{i}_k^2}.$$

където:

$$\hat{i}_k = 1,414i_{k-2} - i_k; \quad \hat{u}_k = 1,414u_{k-2} - u_k.$$

Вторият метод използва алгоритъм на базата на две извадки, отдалечени една от друга на разстояние $m=4$ при дискретизация на сигнала с честота $N=16$. Изразите за X и R добиват следния вид:

$$(14.4.4.2) \quad R = \frac{u1i1 + u2i2}{i_1^2 + i_2^2}; \quad X = \frac{u1i2 - u2i1}{i_1^2 + i_2^2}.$$

При третия метод изчисляването на X и R става с помощта на дискретите с поредни номера:

$$(14.4.4.4) \quad \left\{ \begin{array}{l} R = \frac{2u(k-1)i(k-1) - u(k)i(k-2) - u(k-2)i(k)}{2[i^2(k-1) - i(k-2).i(k)]}; \\ X = \frac{u(k-1).i(k-1) - u(k).i(k-1)}{i^2(k-1) - i(k-2).i(k)} 0,3827 \end{array} \right.$$

14.4.5. Характеристика на заработване на защитата

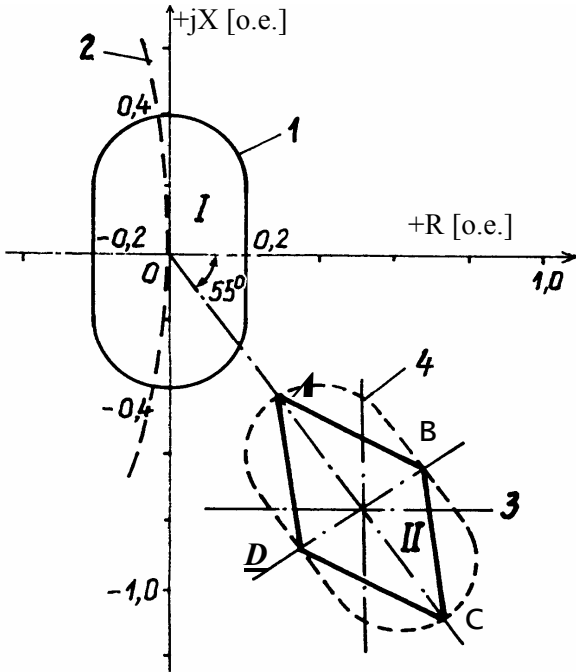
Основните принципи за избор на характеристиката са следните:

- Защитата да има две области на заработване, условно наречени зона I и зона II.
- Зона I (фиг. 14.4.5.1, криви 1 и 2) защитава СГ срещу АР на възбуден генератор и не се различава от използваните в АЕЦ-ЕП-1 при СГ от №5 до №8 защити срещу загуба на синхронизъм.
- Зона II защитава СГ срещу АРЗВ и има форма на ромб или елипса (фиг. 14.4.5.1, криви 3 и 4). Те са ориентирани по големия диагонал (или диаметъра по голямата ос) под ъгъл 55^0 спрямо оста R и са изместени спрямо началото на координатната система на разстояние 0,5 о.е. Съотношението между големия и малкия диагонал или големия и малкия диаметър е 2,5/1. При попадане на вектора $Z(t)$ в зоната защитата заработва без закъснение.

Зоната на заработване е синтезирана от областите на движение на вектора $Z(t)$ в изследваните режими. От фиг.14.1.2 се вижда, че само при режими от област γ векторът не пресича характеристиката. Режимите от тези области са извън разрешената експлоатационна област на диаграмата на мощността и са практически нереални. Във всички останали случаи векторът $Z(t)$ сигурно попада в характеристиката.

Така избраните характеристики са отстроени от режими на дълбоки синхронни люлеения, при които векторът $Z(t)$ се движи в значително по-отрицателните области на трети и четвърти квадрант.

Характеристиката с форма на ромб е с по-голяма сигурност в сравнение с елиптична характеристика. Тя се формира чрез уравненията на четири прави:



Фиг. 14.4.5.1. Характеристика на зоната на заработване на УУАР

Правя А-В : $XA=X_1 + C_1 R$; ($X_1 < 0$; $C_1 < 0$; $R > 0$);

$$X_1 = -0,258; C_1 = \operatorname{tg}(-30^\circ) = -0,5772;$$

Правя В-С : $RB=R_1 - C_2 X$; ($R_1 > 0$; $C_2 > 0$; $X < 0$);

$$R_1 = 0,593; C_2 = \operatorname{tg} 5^\circ = 0,0874;$$

Правя D-C : $XD=X_2 + C_3 R$; ($X_2 < 0$; $C_3 < 0$; $R > 0$);

$$X_2 = -0,718; C_3 = \operatorname{tg}(-30^\circ) = -0,5772;$$

Правя А-D : $RA=R_2 - C_4 X$; ($R_2 > 0$; $C_4 > 0$; $X < 0$);

$$R_2 = 0,251; C_4 = \operatorname{tg} 5^\circ = 0,0874.$$

Векторът Z ще попадне в зоната на за-работване при изпълнение на следните неравенства:

$$(14.4.5.5) \quad \begin{cases} X_1 + C_1 R < X < X_2 + C_3 R, \\ R_2 - C_4 X < R < R_1 - C_2 X. \end{cases}$$

Така реализирани, характеристиките осигуряват максимално бързодействие на УУАР и фиксиране на режима преди първото превъртане на ротора относно магнитното поле на статора. Логичните условия са следните:

Ако е възприет режим на изключване на СГ

при АР, при попадане на вектора $Z(t)$ в която и да е зона УУАР подава импулс за изключване на АГП и генератора. При АР на възбуден генератор векторът $Z(t)$ ще попадне първоначално в зона I. При отказ на УААР да действа в тази зона и попадане на вектора в зона II, УУАР отново трябва да подаде управляващ сигнал. Втората зона резервира първата.

Ако е възприет режим на изключване на СГ при АР на възбуден генератор, но СГ се разтоварва при АРЗВ, логиката на действие на защитата е следната:

- При попадане на вектора $Z(t)$ в зона I УУАР подава импулс за изключване на АГП и генератора.
- При попадане на вектора $Z(t)$ в зона II УУАР подава импулс за изключване на АГП, извеждане на АРВ и разтоварване на СГ.
- При отказ на УУАР да заработи в зона I (АР на възбуден генератор) и попадане на вектора в зона II СГ ще премине в АРЗВ с разтоварване на СГ, като възбудителната намотка е затворена през съпротивлението на самосинхронизация.

Ако е възприет режим на разтоварване на СГ, независимо от характера на АР, и в двете зони защитата ще подава сигнали за изключване на АГП, извеждане на АРВ и разтоварване на СГ. В този случай АР на възбуден СГ ще преминава в АРЗВ с разтоварване на СГ, като възбудителната намотка е затворена през съпротивлението на самосинхронизация. Зона II ще е основна при АРЗВ и ще резервира зона I в случаи на АР на възбуден генератор.

По горните логични условия е съставен и подходящ алгоритъм за защитата.

В глава петнадесета на дисертацията са направени изводи от част четвърта “Моделиране на входни величини за защита при загуба на възбудене на синхронни генератори”.

Заклучение

Приносите на автора са посочени в отделни глави в края на всяка от четирите части на дисертацията. Основните приноси могат да бъдат обобщени по следния начин:

1. Формулиране и обосноваване на нови проблеми и хипотези

1.1. Обоснован е проблемът за случайния характер на входните величини – големина и форма на тока и напрежението с нулева последователност при земно съединение в разпределителните мрежи и са синтезирани критерии и показатели за нова селективна земна защита. Резултати са получени аналитично и са доказани с голям брой измервания директно в ЕЕС и в лабораторни условия.

1.2. Обосновани са възможните аварийни състояния на възбудителната верига на синхронен генератор при загуба на възбуждане, намерени са аналитично ходографите на токовете и напреженията при повреда и е синтезирана област в комплексната равнина на импеданса при продължителна работа в такъв режим.

1.3. Формулиран е проблемът за намиране на първичния ток на късо съединение при известен вторичен ток и параметри на токовия трансформатор и е обосновано неговото решение за конкретни случаи.

2. Доказване с нови средства на съществени нови страни в съществуващи научни теории и проблеми

2.1. Чрез цифров запис на токове и напрежения са определени в експлоатационни условия характеристики “напрежение-ток” и чрез тях параметри на измервателни трансформатори, необходими за съставяне на техни нелинейни модели. Построени са нелинейни характеристики за материала на магнитопровода, включително и хистерезисни цикли.

2.2. Създадени са с помощта на програмните продукти EMTP-ATP и TURBO-PASCAL нови математически модели на силов трансформатор с оглед на получаване на ударните токове при включване на празен ход.

2.3 Създадени са оригинални математически модели на токови трансформатори чрез:

- резисторни модели,
- неприведени схеми,
- невронни мрежи,
- модели по Маделунг и Джайлс-Атертон с отчитане на частни хистерезисни цикли.

2.4. Приложен е методът с пространство на състоянията и в Matlab е получено рационално решение за работата на индуктивни напрежителни трансформатори в преходен режим.

2.5. За конкретен капацитивен напрежителен трансформатор е съставен точен математически модел за установен режим и е оценена съвместната работа на индуктивни и капацитивни напрежителни трансформатори с релейните защиты.

2.6. Създадени са нови програми в Matlab и PSpice, които пълно описват установените и преходни процеси в разпределителните мрежи при всички режими на неутралата с възможност за отчитане на изменението на всеки параметър. Моделирано е и земно съединение през прекъсваща дъга.

3. Създаване на нови класификации, методи, алгоритми и програмни системи

3.1. Създадена е класификация на входните величини на земните защиты в разпределителните мрежи и е направена количествена оценка с оглед възможността за използване при земните защиты.

3.2. Създаден е алгоритъм на нова многокритериална земна защита.

3.3. Предложен е нов алгоритъм на защита, която селективно определя режима “загуба на възбуждане” и въздействия на управлението на синхронния генератор.

3.4. Създадена е и илюстрирана с реални данни методика за прецизна лабораторна оценка на токови трансформатори тип Феранти при работата им съвместно с цифрови земни защиты.

4. Получаване и доказване на нови факти

4.1. Получен е чрез измерване и доказан чрез анализ първичен ток на земно съединение в компенсирана мрежа и са доказани причините за неговото изместване спрямо оста на времето.

4.2. Получено е чрез измерване и доказано експериментално прехвърляно по капацитивен път деформирано напрежение във вторичната страна на индуктивен напрежителен трансформатор, което причинява неправилно отчитане на електрическа енергия на потребителите.

4.3. Получено е чрез измерване и доказано аналитично и експериментално комутационно пренапрежение във вторичната страна на токов трансформатор, натоварен едновременно с електромеханична и цифрова защита.

4.4. Получени са чрез измерване и доказани експериментално кратки токови импулси във вторичните токови вериги на изключен електропровод, които причиняват излишно отчитане на електроенергия.

4.5. Доказана е експериментално възможността за самостоятелна работа на една Микро-ВЕЦ с асинхронен генератор и са определени отклоненията на входните величини на нейните защиты.

5. Предложения за внедряване

Основната част от проведените експериментални изследвания са проведени по поръчка на предприятия от ЕЕС на Република България и резултатите са използвани директно за оценка на съоръженията, поведението и избора на типа и настройките на релейни защиты и измервателни трансформатори. Конкретни резултати от измерване и изчисления са представени като приложения към дисертацията. В дисертационната работа е приложен също списък на научно-изследователски разработки.

Научни статии и доклади, свързани с дисертацията

- STV.* **Вичев С. Т.** Поведение на токови входни преобразователи с ферромагнитна индуктивна връзка в релейните защиты при стационарен и преходен режим. Дисертация за научна степен "доктор", ТУ - София, 26.03.1976
- 1STV.* **Вичев С. Т.** Преходни процеси при земно съединение в компенсирани мрежи средно напрежение. Изв. ВМЕИ, том 30, кн. 3 1973, стр. 45-58
- 2STV.* Hinova, I., S. Saparew, **S. Witschew.** Ein Beitrag zur Analitischen Behandlung des Harmonischen Spektrums des Ausgangssignals bei einem nichtlinearen System. Archiv fur Elektrotechnik, 61(1979), s. 303-307
- 3STV.* Фархи С. Л., **С. Т. Вичев**, К. Д. Тагаров. Анализ переходных процессов в цепях с трансформаторами тока. Электричество, №2/1983, с. 61-64
- 4STV.* **Вичев С.**, Н. Неделчев. Анализ на алгоритми за цифрови измервателни органи на дистанционни защиты. Энергетика, №1/1984, с. 24-27
- 5STV.* Hinova I., **St. Witschew**, D. J. Danailow. Analyse eines nichtlinearen ferromagnetischen Systems bei nichtsinusfoermiger Eingangsschwingung. 29. Internationales wissenschaftliches Kolloquium. Tech-nische Hochschule Ulmenau, DDR, Gastvortrag, 29. Intern.-Wiss. Koll., TH Ilmenau, 29.Oktober bis 2. November 1984, s. 165-167
- 6STV.* Златоустов Н. М., **С. Т. Вичев.** Подобряване на работата на електронни релета при наличие на аперидична съставяща в тока на късо съединение. Известие на ВМЕИ - София, том 40, кн. 5, 1985, с. 81-91
- 7STV.* Хинова И. Г., **С. Т. Вичев**, В. Миловански. Моделиране на магнитната характеристика В(Н) на токов трансформатор при динамичен процес на намагнитване. Юбилейна сесия "40 години ВМЕИ - София", 1985, л. 6/7, с. 1-6
- 8STV.* **Вичев С. Т.**, Д. Й. Данаилов. Изследване на тока на празен ход и на късо съединение на силов трансформатор с оглед работата на диференциалната му защита. Юбилейна сесия "40 години ВМЕИ - София", 1985, л. 5/12, с. 1-6
- 9STV.* Hinova I., **S. Witschew**, T. Kujumdjieff. Dynamische Magnetisierung ferromagnetischer Medien bei nichtsinusfoermiger Eingangsschwingung. E.u.M. Jahrgang 103, Heft 1, 1986, s. 31-33
- 10STV.* **Вичев С. Т.** Цифрово линеаризиране на токови трансформатори. Сборник доклади от III национална научна-техническа конференция "Проблеми на развитието и експлоатацията на елек-троенергийните системи", ЕЛЕНЕРГО '88. Варна, 13-15.X.1988. Том 3, с. 151-156
- 11STV.* **Вичев С. Т.**, Д. В. Иванов, К. Г. Георгиев. Изпитване на релейни защиты с използване на цифрово симулиране. Сборник доклади от III национална научна-техническа конференция "Проблеми на развитието и експлоатацията на електроенергийните системи", ЕЛЕНЕРГО '88, Варна, 13-15.X.1988. Том 3, с. 203-210
- 12STV.* Белинска Б., **С. Вичев**, А. Овчаров. Математическо моделиране на преходни процеси в компенсирани мрежи средно напрежение. Энергетика, №7/1990, с. 13-15
- 13STV.* **Вичев С. Т.**, Б. И. Белинска. Селективност и чувствителност на земните защиты в компенсирани мрежи средно напрежение. Энергетика, №2/1991, с. 24-27
- 14STV.* **Вичев С.**, С. Калчев. Целесъобразност от използване на асинхронен режим при загуба на възбуждане на турбогенератор тип ТВВ-220-2А. Энергетика, №1/1993, с. 15-18
- 15STV.* Vichev, S., D. Veltchev. Transients in cable current transformers. International conference ELMA '93, Varna, Proceedings, Oct. 1993, pp. 265-272
- 16STV.* **Vichev, S.**, D. Veltchev. Optimal work of cable current transformers in the earth-fault protections. International conference ELMA '93, Varna, Proceedings, Oct. 1993, pp. 257-264
- 17STV.* Veltchev, D., **S. Vichev.** Finding impulse signals in a cable current transformer. Electronics letters, Vol. 30, № 5, March 1994, pp. 424-226
- 18STV.* **Вичев С.Т.**, А.Б.Цолов, К.М.Малчев, М.П.Миланов. Входен преобразовател за цифрова земна защита. Годишник на ТУ-София, т. 48, кн. 3/1995, с. 341-348
- 19STV.* **Вичев С.**, К.Тагаров. Изчисляване на преходни процеси в силови трансформатори. Годишник на ТУ-София, т. 48, кн. 3/1995, с. 49-54
- 20STV.* Tagarov K. D., **S. T. Vichev.** Digital simulator of transient phenomena in power transformer. The eighteenth convention of electrical and electronics engineers in Israel. IEEE Tel Aviv, Session 1.5.1. Energy conversion. Mach 7-8, 1995, Session 1.5, pp. 1-5
- 21STV.* **Вичев С. Т.** Параметри и характеристики на токови трансформатори тип Феранти. Энергетика, №1-2/1995, с. 29-31
- 22STV.* **Vichev S.** Control and protection of electric power stations and substations by means of digital devices. First international school on "Optimization of energy production and control", Proceedings. May 25-23,1996, Bulgaria, UNESCO Center for Advance Training, pp. 137-173

- 23STV. **Вичев С.**, Д. Вълчев. Числено определяне на първичния ток на токови трансформатори при късо съединение. Електротехника и електроника, №7-8/1996, с. 7-10
- 24STV. **Вичев С.**, С. Калчев. Защита срещу асинхронен режим на мощни синхронни генератори. Годишник на ТУ-София, т. 49/1998, с. 69-79
- 25STV. Овчаров С. Й., **С. Т. Вичев**, П. И. Якимов. Електронни устройства и системи за изпитване на релейни защиты. XXXIII научна сесия "Комуникационни, електронни и компютърни системи '98", сборник доклади, ТУ-София, 15 май 1998, с. 155-161
- 26STV. Овчаров С. Й., **С. Т. Вичев**, В. Г. Великов, П. И. Якимов. Статични и динамични изпитания на релейни защиты. VII международна конференция ЕЛЕКТРОНИКА '98, сборник доклади, книга 3, ТУ-София, 23-25 септември 1998, с. 108-113
- 27STV. **Вичев С.**, В. Туренков, Д. Тодоров. Работа на трифазните електромери при повреди във веригите на напрежителните трансформатори. Енергетика, №5/1998, с. 12-16
- 28STV. **Вичев С.**, Д. Богданов. Съвместна работа на токови трансформатори тип Феранти с цифрови земни защиты. ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2000, 17-19.IX.2000, с. 133-136
- 29STV. **Вичев С.**, Г. Венков, Б. Господинова, С. Минчев. Моделиране на линеен токов трансформатор с помощта на невронни мрежи. ЕНЕРГИЕН ФОРУМ '2000, 17-19.IX.2000, с. 174-177
- 30STV. **Вичев С.** Работа на капацитивни напрежителни трансформатори съвместно с релейни защиты. Енергетика, №8/2000, с. 7-11
- 31STV. **Вичев С.** Комутиционни пренапрежения във вериги на токови трансформатори. Енергетика, №4/2001, с. 30-34
- 32STV. Ovcharov S., **S. Vichev**, P. Yakimov. Investigation on protective relays testing methods. 24th International Spring Seminar on Electronics Technology. Calimanesti-Caciulata. Romania, May 5-9, 2001, pp. 243-247

Авторско свидетелство

- 33STV. **Вичев С. Т.**, С. Н. Нанчев, А. Х. Овчаров. Метод и устройство за селективно определяне на извода с еднофазно земно съединение. Авт. св. №19025 МПКG 01, 31/08, 17.02.1973

Защитили докторанти:

Овчаров А. Х. Изследване на земни съединения в мрежите средно напрежение с неефективно заземена неутрала и селективна земна защита. ТУ - София, 1983

Калчев С. К. Защита срещу загуба на възбуждане на мощни синхронни генератори. ТУ - София, 1999

Цитиране от други автори

Витанов А. Б. Дистанционни релета. Хабил. труд за ст.н.с. I ст., София, 1990. {Цитира: 4STV}

Дьомеланд В. Наръчник по релейна защита. Техника, София, 1981 {Цитира:

Витанов А. Б., Н. М. Златоустов, З. И. Попов, С. Т. Вичев. Полупроводникови релейни защиты. Техника, София, 1975}

Кежов И. Б. Алгоритъм за цифрова дистанционна защита. Дисертация за к.т.н. София, 1993 {Цитира: 4STV}

Новаш В. И., Н. С. Савин. Расчеты и анализ переходных процессов в компенсированной сети с учетом нелинейности дугогасящей катушки. Изв. Энергетика №2/1978 {Цитира: 1STV}

Попов З. И. Синтез на диференциално реле за трансформатори и анализ на работата му. Хабил. труд за ст. н. с. II степен. Енергопроект, София, 1989 {Цитира: *_STV*, 2STV, 5STV, 6STV, 8STV, 9STV. Цитира също:

- Хинова И. Г., С. Т. Вичев, Н. М. Златоустов. Изследване на междинен трансформатор за релейна защита при стационарен режим. Енергетика №4/1973;
- Хинова И., С. Вичев, П. Глогов. Определяне на грешките на напрежителен трансформатор с компенсираща схема. Енергетика №8/1973.}

Ячев И. Изследване на изменението във времето на потоците при многоядрени токови трансформатори. Енергетика, №3/1989 {Цитира: *_STV*, 3STV. Цитира също:

- Вичев С. Аналитично определяне на небалансирания ток при диференциалните релейни защиты. Известие на ВМЕИ-София, том 35, Октомври 1977.}