ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Инженерно-педагогически факултет - Сливен
Катедра: "Електротехника, автоматика и информационни технологии"

Маг. инж. Константин Венедиктов Райков

СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електрически мрежи и системи

Научни ръководители: 1. Проф. д-р инж. Неделчо Неделчев
2. Проф. д-р инж. Стефка Неделчева

СЛИВЕН, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ към Инженерно-педагогически факултет - Сливен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.10.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22.02.2019 г. от 10.00 часа в зала 1207 на ИПФ, гр. Сливен, бул. „Бургаско шосе“ 59 на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-18 от 09.11.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Стефка Иванова Неделчева – председател
2. доц. д-р инж. Веселин Йорданов Чобанов – научен секретар
3. проф. д-р инж. Петко Петров Нотов
4. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов
5. доц. д-р инж. Антон Георгиев Андонов

Рецензенти:
1. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов
2. доц. д-р инж. Веселин Йорданов Чобанов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ИПФ-Сливен на ТУ-София, бул.“Бургаско шосе“ № 59, Сливен.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ на ИПФ-Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като преобладаващата част от резултатите са публикувани.

Автор: маг. инж. Константин Венедиктов Райков
Заглавие: Смущаващи въздействия при функционирането на устройствата за релейна защита и автоматизация
Тираж: 30 броя
Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Смущенията съпътстват явленията пренасяне, трансформация и разпределение на електрическата енергия. Една от основните задачи на устройствата за релейна защита и автоматизация е да разграничават анормалните режими от наличието на смущения в нормален режим и да изключват защитаваните съоръжения само в първия случай.

Анализът на смущенията при функционирането на устройствата за цифровата релейна защита и системната автоматика е актуален проблем, особено в началния етап на изграждането на интелигентни електрически мрежи. Предстоящата цифровизация на подстанциите и внедряването на цифрови защити и средства за автоматизация изисква прецизното отчитане на очакваните смущения при тяхното функциониране и правилната им настройка за експлоатация.

Ето защо научните изследвания на нерешените проблеми в областта на смущенията и излишните изключвания на устройствата за релейна защита и автоматика (УРЗА), предизвикати от тях, са актуални, тъй като тяхното познаване дава възможност да се повиши надеждността на електроснабдяването.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Обектът на изследването са устройствата за релейна защита и автоматизация в електроенергийната система.

Основна цел на изследването е подобряване на функционирането на устройствата за релейна защита и автоматизация при наличие на смущаващи въздействия.

Основните нерешени проблеми:

- Няма публикувана методика и софтуер за електрически изчисления и симулиране на аварийните режимите и смущенията при функционирането на УРЗА, която да е адаптирана към разпределителните мрежи.
- Няма данни за поведението на УРЗА в разпределителни мрежи с малък ток на земно съединение при попадения на мълнии върху или в близост до въздушни електропроводи (ВЕ) и предизвикваните излишни изключвания.
- Няма резултати от моделирането на динамичните характеристики на електромагнити в схемите на УРЗА.

Набелязаните задачи за изследване в дисертацията са :

- Да се състави методика и софтуер за електрически изчисления и симулиране на аварийните режимите и смущенията при функционирането на УРЗА, която да е адаптирана към разпределителните мрежи.
- Да се адаптира разработената методика, с която се изследват режимните параметри при несиметрии и неуравновесеност по ток и напрежение в разпределителните мрежи, създавани от електрическите товари и от присъединените децентрализирани източници, за нуждите на УРЗА.
- Да се адаптира разработената методика за анализ на непълнофазните режими с отчитане на възникващите смущения с цел определяне на настройките на УРЗА.
- Да се изследва поведението на УРЗА в разпределителни мрежи с малък ток на земно съединение при попадения на мълния върху или в близост до ВЕ.
- Да се моделират динамичните характеристики на електромагнити в схемите на УРЗА.

Научна новост

- Предлага се нов подход при симулиране на аварийните режимите в разпределителните мрежи.

- Разработва се методика и софтуер за електрически изчисления на режимните параметри, с които се изчисляват настройките на УРЗА в разпределителните мрежи с отчитане на възникващите смущения.
- Създава се модел, който позволява определяне на динамичните механични и магнитни характеристики на електромагнити за постоянно напрежение при известни динамични електрически характеристики.

Практическа приложимост

- Установени са режимните параметри, по които се съди за наличието на смущения при функционирането на УРЗА.
- Идентифицират се събитията, които са смущаващи въздействия при нормалното функциониране на УРЗА.
- Получена е най-честата причина за смущения, предизвикващи излишни изключвания на УРЗА във вятърните и малките водни централи.
- Установени са случаите, в които защитите в разпределителни мрежи с малък ток на земно съединение действат неправилно или изключват излишно.
- Обосновано е, че защита, действаща на началния знак на мощността с нулева последователност, не е подходяща за въздушни електропроводи в райони с интензивна мълниеносна дейност.

Разработените софтуерни продукти са адаптирани за работа към съществуващия симулатор на режимите в електрическите мрежи и системи към катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на разширен катедрен съвет на катедра "Електротехника, автоматика и информационни технологии" при ТУ - София, ИПФ - Сливен. Части от темата са докладвани на:

- Национална конференция с международно участие "Активно-адаптивни електрически мрежи - 2014", Жеравна, 31 май - 1 юни 2014г
- Пета национална конференция с международно участие *“*Активно-адаптивни електрически мрежи – 2018*”*, Сливен, 18 - 19 май 2018 г.

Публикации

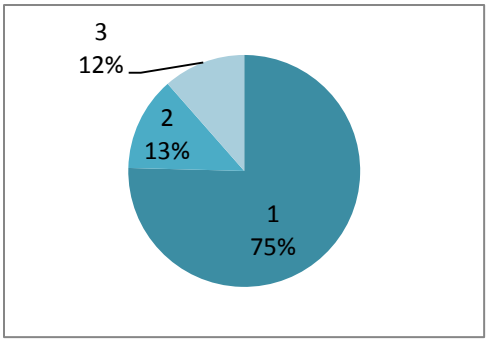
Основни резултати от дисертационния труд са публикувани в 11 бр. научни статии в България, от които 2 бр. самостоятелни.

Структура и обем на дисертационния труд

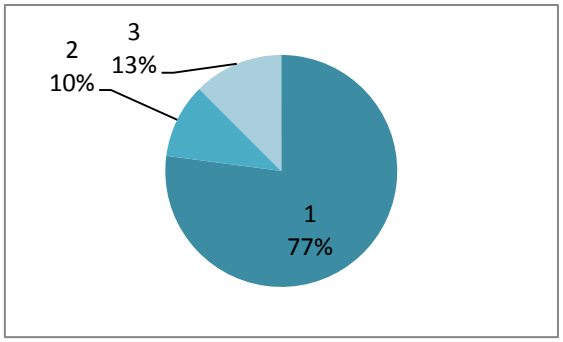
Дисертационният труд е в обем от 132 страници, като включва въведение, 5 глави, списък на основните приноси, приложение, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 117 литературни източници, като 43 са на латиница и 74 на кирилица. Работата включва общо 37 фигури и 15 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въведение. Статистическите данни за изключванията на съоръжения, защитавани с цифрови релейни защити, инсталирани в подрайон на Електроразпределително предприятие в Югоизточна България, се отнасят за 2016 и 2017 г. и са обобщени на фиг. В.1. Към анализираните данни не се включват заработванията на електромеханичните и полупроводниковите релейни защити, които се намират в експлоатация в същия подрайон. От фиг.В.1 се установява, че около 12-13 % от изключванията на цифровите защити са излишни и се дължат на неправилна настройка, неотчитаща възможните смущения в електрическите разпределителни мрежи.



а



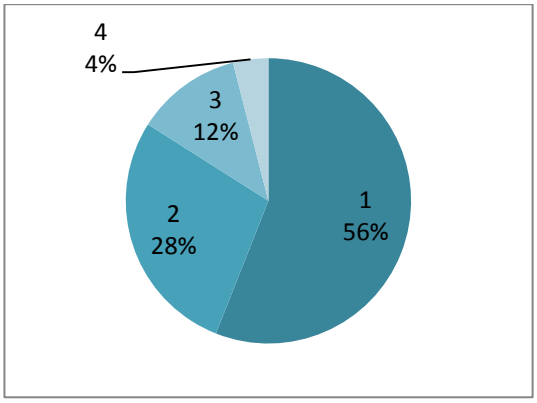
б

Фиг. В.1. Статистически данни за изключвания на съоръжения, защитавани с цифрови релейни защити: а – за 2016 г.; б – за 2017 г.; 1 – защитата изключва и посочва повреденото присъединение; 2 – самовъзстановяване след изключване от релейната защита; 3 – излишно заработване

По статистика за причините за аварийност в електропреносната мрежа на ЕЕС, около 15% от тежките аварии възникват поради неправилни действия на релейната защита и противоаварийната автоматика.

На фиг. В.2 е представена статистика на основните причини за неправилни действия на цифровите защити.

Неправилните действия поради грешки в настройката на цифровите защити са 12 %. Част от тях се дължат на неотчитане на смущенията при определяне на настроечните параметри. Следователно съвременните цифрови защити са чувствителни към външни смущения и тяхната надежна работа изисква да се осигури добра защита от тях.



Фиг.В.2. Причини за неправилни действия на цифровите защити: 1 – грешки в софтуерната част; 2 – грешки в апаратната част; 3 – грешки в настройката; 4 – неизяснена причина

Глава първа

1. СМУЩЕНИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИТЕ ОБЕКТИ

Изграждането на интелигентна разпределителна електрическа мрежа Smart grid е свързано с внедряване на средства за наблюдение и автоматизация, позволяващи адекватно и оптимално реагиране на всяко външно и вътрешно смущение.

Целта на изследването в първа глава е да се проучат и анализират смущаващите въздействия в електрическите мрежи, при работата на генериращите източници за производство на електрическа енергия и върху средствата за функциониране на УРЗА, а също да се формулират целта, нерешените проблеми по тематиката и набелязаните задачи за изследване в дисертацията.

1.1. СМУЩЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ И СИСТЕМИ

Излизането на показателите за качеството на електроенергията извън нормираните стойности, а също случайните прекъсвания на електроснабдяването, спадат към смущенията в електрическите мрежи. В електрическите мрежи за 110 kV напрежението във всеки възел се регулира в зададени граници. В разпределителната мрежа за 20 kV и 0,4 kV напрежението не се регулира и се наблюдават чести надвишения на нормираните стойности и прекъсвания на електроснабдяването.

Смущаващи въздействия са също:

- атмосферните и комутационните пренапрежения в електрическите мрежи ;
- пробивите на изолацията на съоръженията при работно напрежение.

Най-често електрическите съоръжения са подложени на въздействието на пренапрежения. Пренапрежението може да се разглежда като напреженов импулс или вълна, които се наслагват върху номиналното мрежово напрежение.

Пренапреженията нарушават работата на електрическите съоръжения и предизвикват електромагнитно излъчване. Освен това, продължителността на пренапрежението създава енергийна вълна в електрическите вериги, която може да разруши електрооборудването.

1.2.СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАБОТАТА НА ГЕНЕРИРАЩИТЕ ИЗТОЧНИЦИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Генераторите в електрическите централи в нормален режим не внасят смущения в електрическата мрежа. Всички анормални режими на генериращите източници предизвикват смущения в нормалната им работа. Това са: несиметрични, несинусоидални и асинхронни режими и др. Несиметричен режим на работа възниква при несиметрично натоварване на синхронните турбогенератори вследствие на прекъснат фазов проводник, при отказ за включване или изключване на автоматичен прекъсвач, при неравномерен товар от монофазни консуматори и др. Това води до протичане през статорните намотки на генератора на токове с обратна последователност. Несинусоидален режим на работа възниква вследствие на включените към генератора консуматори генериращи висши хармоници, които водят до изкривяване на формата на статорния ток и предизвикват допълнителни загуби в статорните и роторните намотки. Асинхронен режим на работа възниква вследствие на пълна или частична загуба на възбуждането на генератора.

Наличието на инвертори в схемите на децентрализираните енергийни източници (ДЕИ) е причина за навлизане на хармоници в присъединителните клонове на електрическата мрежа. Вятърните централи предизвикват колебания на напрежението. Присъединяването на вятърните централи и малките водни електрически централи (ВЕЦ) към електрическите мрежи изисква специални мерки за намаляване на предизвикваните колебания на напрежението и недопускане на хармоници в мрежата, защото тези показатели са нормирани. Включването на голям брой децентрализирани производители на електроенергия към даден клон на разпределителните мрежи налага съобразяване на настройките на защитите с очакваните изменения и смущения на режимните параметри в мрежата.

1.3.СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА И СИСТЕМНАТА АВТОМАТИКА

Параметрите, по които се съди за наличието на смущения, са:

- минимално и максимално ниво на напрежението;
- минимално и максимално ниво на тока;
- ниво на несъответствие на сигнала и основния хармоник във веригата на напрежението;
- ниво на несъответствие на сигнала и основния хармоник на тока.

С тези параметри се идентифицират събитията:

- липса на сигнал или неизправност във вторичните измерителни вериги;
- късо съединение (к.с.);
- прекъсване на фаза в първична или вторична верига;
- комутационни и атмосферни пренапрежения;
- смущения на честотата в измерителните вериги;
- хармоници в мрежата, предизвикани от товара или еднофазни земни съединения.

1.4.НАЧИНИ ЗА ПРЕДСТАВЯНЕ И ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ НА СМУЩЕНИЯТА

Смущенията могат да бъдат представени и описани както във времевата така и в честотната област. Обикновено по-малко важно е точното описание на формата на смущаващият сигнал, както неговите точни параметри от които зависят смущаващи въздействия.

За периодични смущаващи сигнали такива са честотата f и амплитудата U_{max}. Тези параметри определят амплитудата на напрежението на смущаващият сигнал във вторичните вериги U_{smax}.

За непериодични смущаващи сигнали основни се явяват следните параметри:

- скорост на изменение $\frac{\Delta u}{\Delta t}$;
- интервала от време Δt, в течение на който смущаващият сигнал u има най-голямо изменение по амплитуда. Този интервал е идентичен с продължителността на действие на напрежението на смущаващият сигнал U_s във вторичната верига;
- максимална стойност на изменение на амплитудата Δu, пропорционално на интеграла на напрежението на смущаващият сигнал във вторичната верига във времето.

За представяне на взаимната им свързаност на тези величини от гледна точка на електромагнитната съвместимост при периодични смущения се използва амплитуден спектър, а при импулсни смущения - плътност на спектъра.

Тези два начина на представяне осигуряват:

- оценка на въздействието на смущенията върху системата;
- изчисление на въздействията, причинени от дадената връзка;
- избор на основните параметри на средствата за потискане на смущенията;
- определяне на граничните области, например максимално възможни или допустими стойности на излъчваните смущения или характеристика на границите на устойчивост на смущения;
- получаване на представа за въздействието при изпитания съгласно нормите за електромагнитна съвместимост т.е. за параметрите на генераторите използвани при изпитанията.

1.5. АВТОМАТИЗИРАНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ И ЗАПИС НА ДАННИ

Основната цел при извършване на мониторинг на енергиен източник е проследяване ефективността на системата, обхващащо измерване и записване на произведената електроенергия и основни параметри като напрежение, ток, слънчева радиация, околна температура, влажност, скорост и посока на вятъра, температура на съоръженията и др.

Мониторингът дава възможност за проследяване надеждността на системата, което включва мониторинг на повредите, причините за тях, времето на престой, планираните и непланираните ремонти и подмяната на компоненти на системата. Измерването на тези параметри позволява на техническия персонал лесно да извършва анализ на състоянието и работоспособността на енергийните съоръжения.

Основните величини, чийто стойности се обработват и записват, са електрически и неелектрически. Много често неелектричните величини се преобразуват с помощта на трансмитери в електрически величини, които след подходящо мащабиране се обработват от системите за мониторинг.

С развитието на микропроцесорната техника се появиха нови измервателни апарати, които са обособени като самостоятелни устройства с вграден комуникационен интерфейс позволяващ изпращане на измерените величини директно в бинарен код към системите за мониторинг посредством сериен интерфейс или TCP/IP протокол по Ethernet.

1.6. ИЗВОДИ ПО ПЪРВА ГЛАВА

- Параметрите, по които се съди за наличието на смущения в даден момент от време при функционирането на УРЗА са: минимално и максимално ниво на напрежението; минимална и максимална стойност на тока; ниво на несъответствие на сигнала и основния хармоник във веригата на напрежението.
- С параметрите за наличие на смущаващи въздействия се идентифицират събитията: повреда във вторичните измерителни вериги, к.с., прекъсване на фаза в първична или вторична верига; комутационни и атмосферни пренапрежения; смущения на честотата в измерителните вериги; хармоници в мрежата.

Глава втора

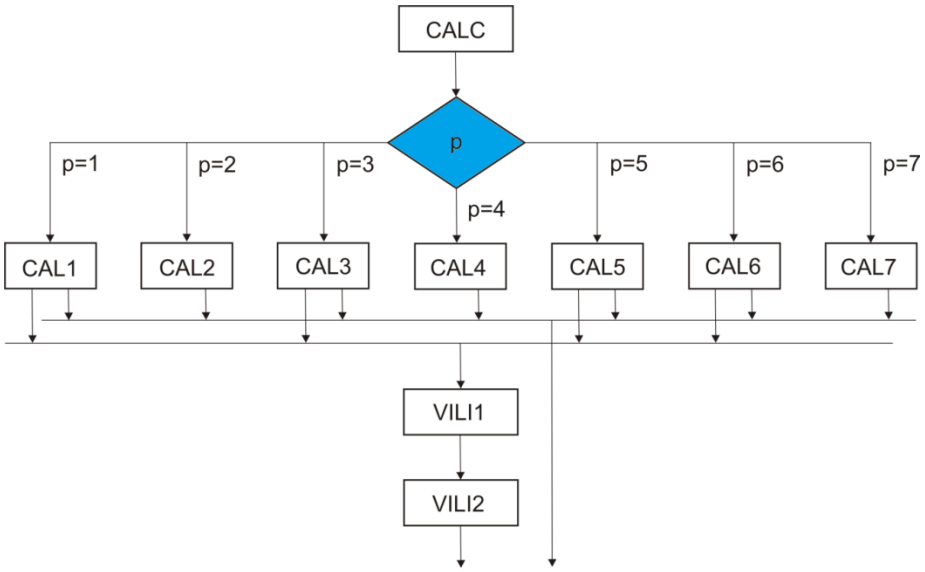
2. СЪЗДАВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА АНАЛИЗ НА СМУЩЕНИЯТА ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА И СИСТЕМНАТА АВТОМАТИКА

Целта на разработката във втора глава е да се създаде методика и софтуер, предназначени за електрически изчисления и симулиране на аварийните режимите и смущенията при функционирането на УРЗА, която да се адаптира към разпределителните мрежи.

2.1. МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНКА НА СМУЩЕНИЯТА ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА И СИСТЕМНАТА АВТОМАТИКА В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ

В катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ е разработен симулатор, предназначен за провеждане на електрически изчисления и моделиране на режимите в разпределителните мрежи за СН и НН без и с ДЕИ. Към симулатора няма специално разработени модули за изчисляване на токовете на к.с. за нуждите на РЗА, които да са адаптирани за изследване на тяхното поведение при симулиране на смущения от режимен характер.

Структурата на симулатора се запазва, но към някои изчислителни блокове се добавят нови модули. В преработения вариант се съставят изчислителните схеми на разпределителната мрежа с права, обратна и нулева последователност. Измененията в основния изчислителен блок на компютърната програма са дадени на фиг.2.1.



Фиг.2.3. Описание на блок BLOCK-C

Намира се разпределението на мощностите в клоновете и напреженията във възлите на съставената изчислителна схема с модул CALC, след което се изпълнява един от съдържащите се 7 модула, в зависимост от избраният параметър за оценяване, съответно: $p = 1$ - определяне на напрежението във възлите (CAL1); $p = 2$ - изследване на пропускателната способност на линиите (CAL2); $p = 3$ - изчисляване на токовете на к.с. (CAL3); $p = 4$ - устойчивост по напрежение във възлите (CAL4); $p = 5$ - несиметрия и неуравновесеност на токовете и напреженията (CAL5); $p = 6$ - хармоници в присъединителния възел (CAL6); $p = 7$ - реактивна мощност, внасяна в присъединителния клон от ДЕИ (CAL7) – фиг.2.3.

Четири от програмните модули в блок CAL са преработени за провеждане на изчисления, с които да се определят параметрите за нуждите на релейните защити и средствата за автоматизация. Това са модулите CAL1 - определяне на напрежението във възлите; CAL3 - изчисляване на токовете на к.с.; CAL5 - несиметрия и неуравновесеност на токовете и напреженията; CAL6 - хармоници в присъединителния възел. Резултатите от изчисленията в модули CAL1, CAL3, CAL5 и CAL6 се подават като входни данни в новосъздадените блокове VILI1 и VILI2, с които съответно се отчита наличието на смущения в режимните параметри и се изчисляват токовете на к.с. при наличието на смущения. След приключване на работата на блок VILI1 и VILI2 се преминава към визуализация или таблично представяне на получените резултати.

Блокът за отчитане на наличието на смущения VILI1 в реално време изчислява и следи параметрите: минимална и максималната стойност на напрежението и на тока; ниво на несъответствие на сигнала и основния хармоник на напрежението и на тока.

Стойностите на токовете на к.с. се представят, след уточняване на мястото на к.с. и броя на присъединяваните ДЕИ и се изчисляват в модул CAL3. В алгоритъма се предвижда възможност за изчисляване на токовете на к.с. при голям брой ДЕИ с общ присъединителен възел, а също изчисляването на токовете при двойно земно съединение в електрически мрежи, работещи с изолиран звезден център.

В блок VILI2 се преизчисляват токовете на к.с. с отчитане на стойностите на режимните параметри след отчитане на смущаващите въздействия.

Освен токовете на к.с., в блок VILI2 се преизчисляват напреженията във възлите, несиметрията, неуравновесеността и хармоничния състав на токовете и напреженията.

Обобщение:

- Разработената методика и софтуер, предназначени за електрически изчисления и симулиране на нормалните и аварийните режимите и възникващите смущения е полезна за изчисляване на настройките на УРЗА в разпределителните мрежи.
- Новите блокове към съществуващия симулатор позволяват да се отчитат смущенията и тяхното влияние върху функционирането на УРЗА.
- Модулният принцип, на който са изградени изчислителните блокове в симулатора, позволява да се провеждат изчисления на нормалните и аварийните режими в различните видове разпределителни мрежи без и с присъединени ДЕИ.

2.2. АДАПТАЦИЯ НА МЕТОДИКАТА ЗА ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ, ОТЧИТАЩИ НАЛИЧИЕТО НА СМУЩЕНИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА И СИСТЕМНАТА АВТОМАТИКА

2.2.1. ВЪВЕДЕНИЕ

Целта е за нуждите на УРЗА да се адаптира разработената методика, с която да се изследват режимните параметри при несиметрии в разпределителните мрежи, създавани от електрическите товари и от присъединените ДЕИ.

2.2.2. ВЛИЯНИЕ НА НЕСИМЕТРИЯТА НА ТОКОВЕТЕ И НАПРЕЖЕНИЯТА ВЪРХУ РАБОТАТА НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Появата на напрежения и токове с обратна и нулева последователност U_2, U_0, I_2, I_0 предизвиква допълнителен пад на напрежението и загуби на мощност и енергия. Токовете с обратна и нулева последователност I_2, I_0 увеличават загубите в надлъжните клонове на мрежата, а напреженията и токовете с тези последователности - в напречните клонове.

Наслагването на напреженията U_2 и U_0 води до допълнителни отклонения на напрежението в различните фази. Ето защо напреженията могат да излязат извън допустимите граници. Наслагването на токовете I_2 и I_0 предизвиква нарастване на сумарните токове в отделните фази. Тези увеличения на напреженията или токовете могат да превишат настроените параметри и да предизвикат излишно заработване на устройствата за РЗА.

Несиметрията на напреженията и токовете се характеризира с :

- коефициентите на несиметрия на напрежението и тока;
- коефициентите на неуравновесеност на напрежението и тока.

Допустимите стойности на коефициентите $\dot{k}_u, \dot{k}_i, \dot{k}_{0u}$ и $\dot{k}_{0i}$ са нормирани в стандартизационните документи.

За целите на релейните защити е необходимо следене на режимните параметри и отчитане на възможностите за тяхното нарастване поради несиметрии и превишение на настроените стойности за заработване на устройствата за РЗА. Наситеността на разпределителните мрежи с ДЕИ изисква в алгоритъма да бъде включена: несиметрията от мрежата, несиметрията от товара и създаваната несиметрия от ДЕИ.

Основните уравнения за описване на трифазна система с надлъжни или напречни елементи се записват за случай на симетричен товар и несиметрия, внасяна от ДЕИ и несиметрия от товара при симетричен режим от ДЕИ.

Блок за въвеждане на входните данни

За работа на модули CAL5 и VILI2 от фиг.2.3, се въвеждат следните входни данни: $\dot{E} = \dot{E}_1$ - е.д.н. на захранващия източник, което е с права последователност; $\dot{Z}_s$, (s=1,2,0) - съпротивленията с права, обратна и нулева последователност; $\dot{Z}_N$ - съпротивлението на звездния център на захранващия източник; $\Delta\dot{U}_i$, (i=A,B,C) - фазни падове на напрежението в участъците с надлъжна несиметрия; $\Delta\dot{U}_s$, (s=1,2,0) - съставките с права, обратна и нулева последователност на падовете на напрежение в участъците с надлъжна несиметрия; $\dot{I}_i^{(C)}$,(i=A,B,C) - фазните токове на симетричния товар; $\dot{I}_s^{(C)}$, (s=1,2,0) - съставките с права, обратна и нулева последователност на токовете в надлъжния участък на мрежата; $\dot{I}_s^{(H)}$, (s=1,2,0) - съставките с права, обратна и нулева последователност на токовете на несиметричния товар; $\dot{I}_i^{(H)}$,(i=A,B,C) - фазните токове на несиметричния товар; $\dot{Z}_N^{(C)}$ и $\dot{Z}_N^{(H)}$- съпротивлението на звездния център съответно при симетричен и несиметричен товар.

Изчислителен блок CAL5 (от фиг.2.3):

Основните уравнения за описване на система, съдържаща надлъжни или напречни елементи, са следните:

- с права последователност:

(2.11) $$\dot{I}_1\dot{Z}_1 + \Delta\dot{U}_1 + \dot{U}_1 = \dot{E}_1; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_1^{(H)} + \dot{I}_1^{(C)}; \quad \dot{U}_1 = \dot{I}_1^{(C)}\dot{Z}_1^{(C)};$$

- с обратна последователност:

(2.12) $$\dot{I}_2\dot{Z}_2 + \Delta\dot{U}_2 + \dot{U}_2 = 0; \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_2^{(H)} + \dot{I}_2^{(C)}; \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_2^{(C)}\dot{Z}_2^{(C)};$$

- с нулева последователност:

$$\dot{I}_0(\dot{Z}_0+3Z_N)+\Delta\dot{U}_0+\dot{U}_0^{(H)}+3\dot{I}_0^{(H)}\dot{Z}_N^{(H)}=0;\qquad \dot{I}_0=\dot{I}_0^{(H)}+\dot{I}_0^{(C)};$$

(2.13) $$\dot{U}_0^{(H)}+3\dot{I}_0^{(H)}\dot{Z}_N^{(H)}=\dot{I}_0^{(C)}(\dot{Z}_0^{(C)}+3\dot{Z}_N^{(C)}),$$

2.2.3. МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ НА ИЗТОЧНИЦИТЕ НА НЕСИМЕТРИИ

За изчисляване на несиметричните режими в електрическа мрежа, основните уравнения (2.11), (2.12) и (2.13), получени от заместващите схеми с различни последователности, се допълват с уравнения, съставени за начина на свързване и параметрите на несиметричните товари.

- **Несиметричен товар с елементи, свързани в триъгълник:**

Изчисляването на несиметричните режими се извършва със системата на симетричните координати. В матриците на напреженията $\dot{\mathbf{U}}_s^{(H)}$ (s=1,2,0) и токовете $\dot{\mathbf{I}}_s^{(H)}$ (s=1,2,0) се включват съответните стойности на правата, обратната и нулевата последователност на напреженията и токовете.

Стъпка 1. Определят се елементите на матрицата на проводимостите:

(2.14) $$\dot{m}_{22}^{(H)}=\dot{m}_{33}^{(H)}=\dot{Y}_{AB}^{(H)}+\dot{Y}_{CA}^{(H)}+\dot{Y}_{BC}^{(H)};$$

(2.15) $$\dot{m}_{23}^{(H)}=-\left(a\dot{Y}_{AB}^{(H)}+a^2\dot{Y}_{CA}^{(H)}+\dot{Y}_{BC}^{(H)}\right);$$

(2.16) $$\dot{m}_{32}^{(H)}=-\left(a^2\dot{Y}_{AB}^{(H)}+a\dot{Y}_{CA}^{(H)}+\dot{Y}_{BC}^{(H)}\right),$$

където $\dot{Y}_{AB}^{(H)},\dot{Y}_{CA}^{(H)},\dot{Y}_{BC}^{(H)}$ са проводимостите на елементите, свързани в триъгълник.

Стъпка 2. Определят се токовете $\dot{\mathbf{I}}_s^{(H)}$ (s=1,2,0):

(2.17) $$\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(H)}\\ \dot{I}_1^{(H)}\\ \dot{I}_2^{(H)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & \dot{m}_{22}^{(H)} & \dot{m}_{23}^{(H)}\\ 0 & \dot{m}_{32}^{(H)} & \dot{m}_{33}^{(H)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{U}_0^{(H)}\\ \dot{U}_1\\ \dot{U}_2\end{bmatrix},$$

където $\dot{a}$ е комплексният фазов оператор.

- **Несиметричен товар с елементи, съединени в звезда:**

Фазните токове се изразяват с уравненията:

(2.18) $$\dot{I}_i^{(H)}=\dot{U}_i^{(H)}\dot{Y}_i^{(H)},\ (i=A,B,C),$$

където $\dot{Y}_i^{(H)}$, ($i=A,B,C$) са проводимостите на елементите на несиметричния товар, съединени в звезда.

Стъпка 1. Определят се елементите на матрицата на проводимостите:

(2.19) $$\begin{aligned}\dot{m}_{11}^{(H)}&=\dot{m}_{22}^{(H)}=\dot{m}_{33}^{(H)}=\dot{Y}_A^{(H)}+\dot{Y}_B^{(H)}+\dot{Y}_C^{(H)};\\ \dot{m}_{12}^{(H)}&=\dot{m}_{31}^{(H)}=\dot{m}_{23}^{(H)}=\dot{Y}_A^{(H)}+a^2\dot{Y}_B^{(H)}+a\dot{Y}_C^{(H)};\\ \dot{m}_{21}^{(H)}&=\dot{m}_{32}^{(H)}=\dot{m}_{13}^{(H)}=\dot{Y}_A^{(H)}+a\dot{Y}_B^{(H)}+a^2\dot{Y}_C^{(H)};\end{aligned}$$

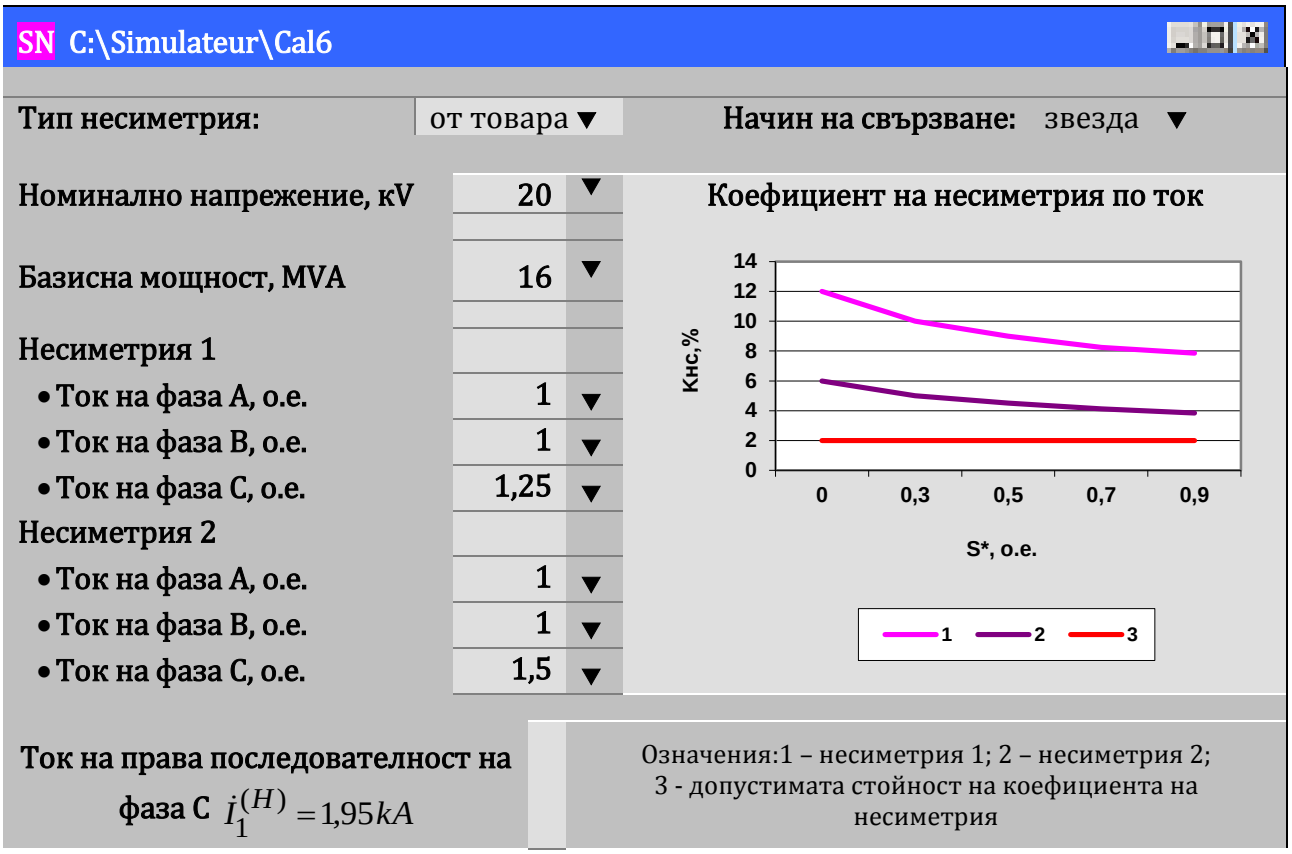
Стъпка 2. Определят се токовете $\dot{\mathbf{I}}_s^{(H)}$ (s=1,2,0):

(2.20) $$\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(H)}\\ \dot{I}_1^{(H)}\\ \dot{I}_2^{(H)}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}\dot{m}_{11}^{(H)} & \dot{m}_{12}^{(H)} & \dot{m}_{13}^{(H)}\\ \dot{m}_{21}^{(H)} & \dot{m}_{22}^{(H)} & \dot{m}_{23}^{(H)}\\ \dot{m}_{31}^{(H)} & \dot{m}_{32}^{(H)} & \dot{m}_{33}^{(H)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{U}_0^{(H)}\\ \dot{U}_1\\ \dot{U}_2\end{bmatrix}$$

Стъпка 3. С модул VILI2 от блок BLOCK-C (фиг.2.3) се прави проверка за режимните параметри при несиметрия на токовете и напреженията и по изчислителен път се достига до случаите, в които ще се наблюдават излишни заработвания на устройствата за РЗА.

Числен експеримент

На фиг.2.4 са представени резултатите от изчисляване на параметрите при несиметричен товар в мрежи за СН.



Фиг.2.4. Изчисляване на параметрите при несиметричен товар в мрежи за СН

Токовата защита срещу претоварване на шините, към които са присъединени двигатели, може да заработи от пусковия ток при неправилно избран настроечен ток. Изчисляване на случаите на смущенията по ток, които могат да предизвикат заработвания на защитата, са представени в табл.2.1.

Таблица 2.1. Защита срещу претоварване на шините

Номинално напрежение,kV	Номинален ток на товара, A	Кратност на пусковия ток	Ток при пускане на двигателя, A	Настроечен ток, A
6	19,5	5,7	111,15	110
6	19,5	5,4	105,3	110

Защитите срещу претоварване при превишение на настроечния ток действат на сигнал след определено време (например 4 s). От табл.2.1 се установява, че ако кратността на пусковия ток на двигателите е 5,4, защитата от претоварване няма да се задейства, но при пусков ток с кратност 5,7 – защитата ще действа на сигнал, ако не е зададено достатъчно закъснение за заработване, с което да се изчака да премине процеса на пускане на двигателя.

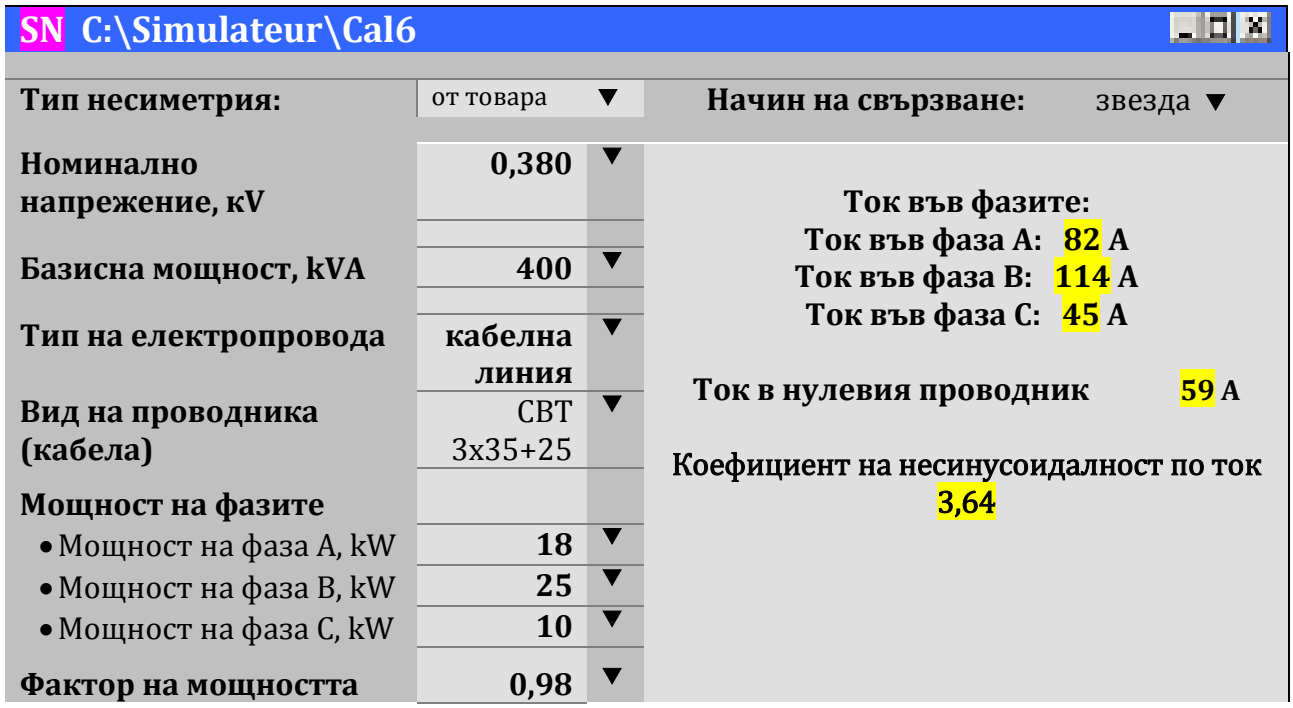
При защита срещу авариен режим, ако сумарна стойност от несиметрията на товара и големината на възникващото смущение надвишава тока на настройка на защитата, тя ще заработи излишно. Случаите на смущенията по ток, които могат да предизвикат излишни заработвания на защитата, са представени в табл.2.2.

Настойката на защита срещу авариен режим се съобразява с върховия ток и токовете на к.с. По време на върховия товар е възможно излишно заработване на защитата, защото големината на тока, породен от външното смущение, се сумира със стойността на върховия товар. Ако тази сумарна стойност надвишава тока на настройка на защитата, тя ще заработи излишно.

Таблица 2.2. Защита срещу аварийни режими

Върхов ток, А	Ток от смущение, А	Сумарен ток, А	Настроечен ток, А
18,2	3,4	21,6	20
19,3	3,4	19,7	20
16,2	3,4	17,6	20
11,4	3,4	14,8	20

На фиг.2.5 да показани резултатите от определяне на токовете във фазовите и нулевия проводници при несиметричен товар в мрежи за НН.



Фиг.2.5. Изчисляване на токовете във фазовите и нулевия проводници при несиметричен товар в мрежи за ниско напрежение

Обобщение:

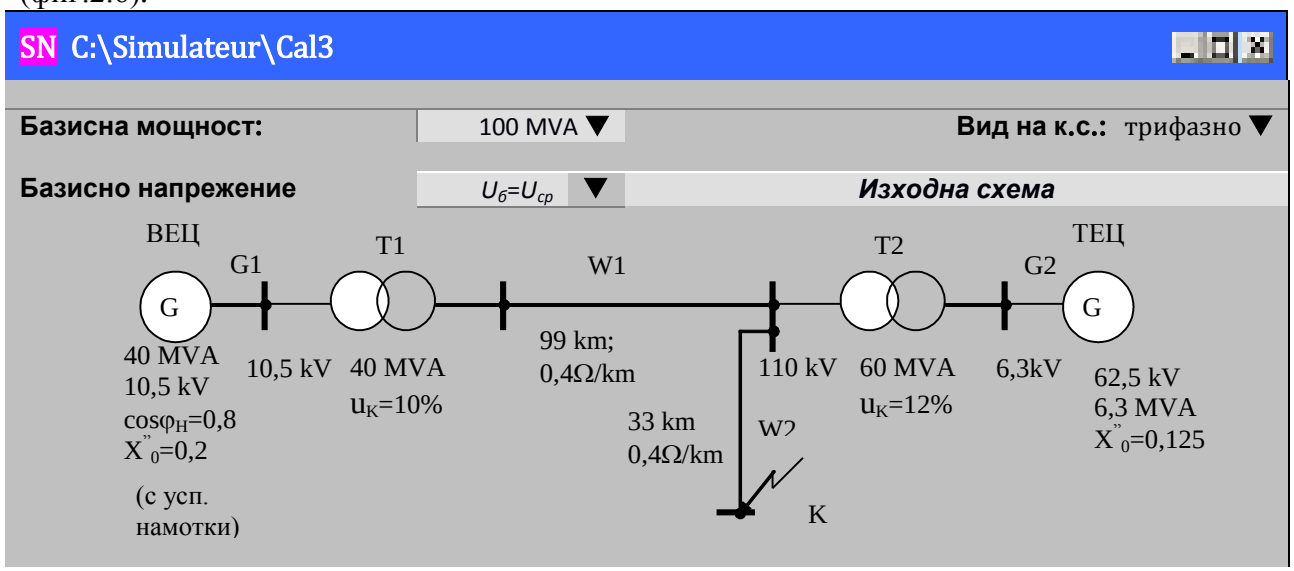
- Наличието на напрежения и токове с обратна и нулева последователност предизвиква допълнителен пад на напрежението и загуби на мощност и енергия. Наслагването на напреженията с обратна и нулева последователност води до допълнителни отклонения на напрежението в различните фази. Ето защо напреженията могат да излязат извън допустимите граници и да се предизвика излишно заработване на устройствата за РЗА.
- Наслагването на токовете I_2 и I_0 предизвиква нарастване на сумарните токове в отделните фази. Тези увеличения на напреженията или токовете могат да превишат настроените параметри и да предизвикат излишно заработване на устройствата за РЗА.
- Адаптацията на методиката за изследване на несиметрични режими в разпределителни мрежи за целите на устройствата за РЗА дава възможност да се следят несиметриите и неуравновесеността по ток и напрежение. Настройката на устройствата за РЗА трябва да се съобразява с реалната възможност от наличие на смущаващи въздействия по време на несиметрия или неуравновесеност.
- Смущенията по ток могат да предизвикат излишни заработвания на защитата, само по време на върховия товар, ако тяхната големина, сумирана със стойността на върховия товар надвишава тока на настройка на защитата. Това се касае за

защитите срещу авариен режим. Защитите от претоварване при превишение на настроечния ток действат на сигнал след определено време (например 5 s).

- Смущенията по ток и напрежение трябва да са с продължителност, надвишаваща настроената, за да предизвикат излишно заработване на защитата.

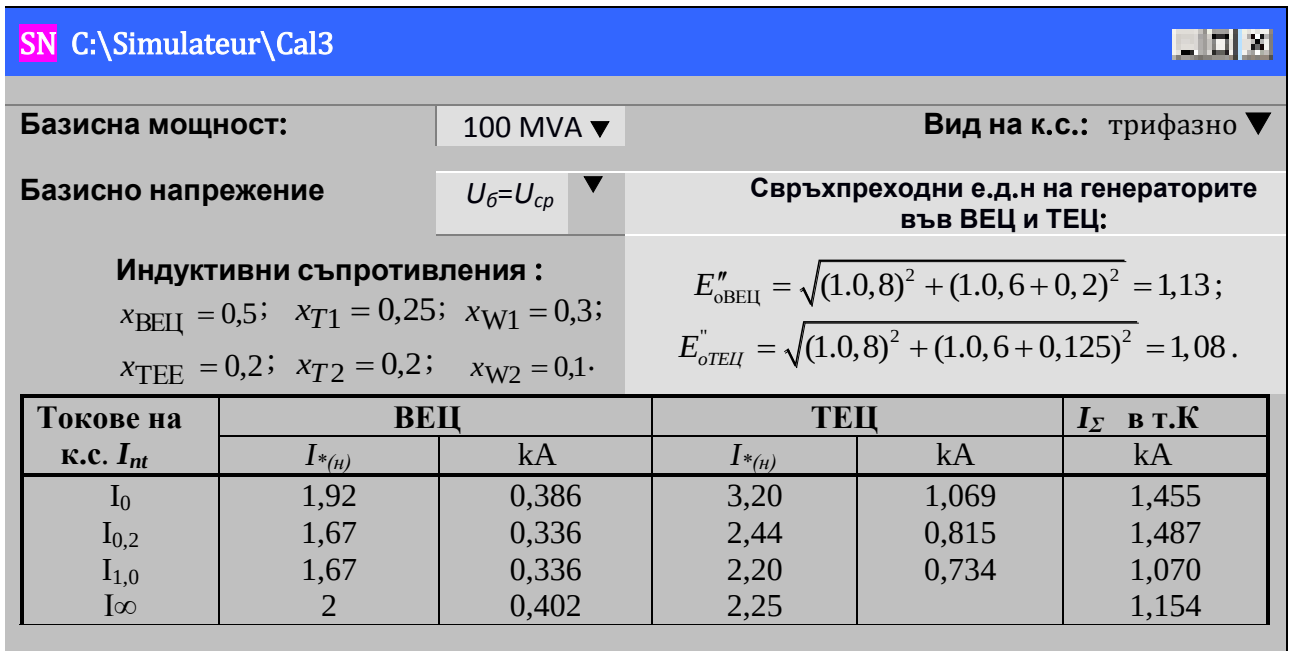
2.3. АДАПТИРАНЕ НА МЕТОДИКАТА ЗА АНАЛИЗ НА НАПРЕЧНИ НЕСИМЕТРИИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА

Изчисляване на токовете на к.с. в симулатора се провеждат с модула CAL3 (фиг.2.6).



Фиг.2.6. Изчисляване на токовете на трифазно к.с. в електрическа мрежа за 110 kV

За изходната схема на електрическата мрежа и въведените входни данни за определяне на параметрите на заместващата схема, се определят режимните параметри при зададен вид к.с. (фиг.2.7).



Токове на к.с. I_{nt}	ВЕЦ		ТЕЦ		I_Σ в т.К
	$I_{*(н)}$	kA	$I_{*(н)}$	kA	kA
I_0	1,92	0,386	3,20	1,069	1,455
$I_{0,2}$	1,67	0,336	2,44	0,815	1,487
$I_{1,0}$	1,67	0,336	2,20	0,734	1,070
I_∞	2	0,402	2,25		1,154

Фиг.2.7. Изчисляване на токовете на трифазно к.с. в електрическа мрежа за 110 kV

С модул VILI2 от блок BLOCK-C (фиг.2.3) се прави проверка за режимните параметри при напречна несиметрия и по изчислителен път се достига до случаите, в които ще се наблюдават излишни заработвания на устройствата за РЗА.

2.4. АДАПТИРАНЕ НА МЕТОДИКАТА ЗА АНАЛИЗ НА НЕПЪЛНОФАЗНИТЕ РЕЖИМИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА РЕЛЕЙНАТА ЗАЩИТА

Преобладаващата част от земните съединения в разпределителните мрежи за СН и НН са еднофазни и изключването на повредената фаза води до запазване на двете други фази в работен режим.

Целта е да се адаптира разработената методика за анализ на непълнофазните режими към симулатора и да се анализират проведените изчисления със съставения софтуер с отчитане на възникващите смущения при работата на устройствата за РЗА.

Изчисляване на режимните параметри при надлъжни несиметрии:

- При пренебрегване на съпротивленията $\dot{Z}_{AB}^{(n)}, \dot{Z}_{CA}^{(n)}, \dot{Z}_{BC}^{(n)}$, които отчитат взаимната връзка между фазите**:**

При надлъжна несиметрия възниква участък с различни съпротивления $\dot{Z}_i^{(n)}$, (i=A,B,C). Падовете на напрежението $\Delta\dot{U}_i$,(i=A,B,C) в участъци с надлъжна несиметрия се изразяват с:

(2.21) $$\Delta\dot{U}_i = \dot{I}_i\,\dot{Z}_A^{(n)}, (i=A,B,C).$$

Изчисляват се елементите на матрицата на импедансите:

$$\dot{k}_{11}^{(n)} = \dot{k}_{22}^{(n)} = \dot{k}_{33}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + \dot{Z}_B^{(n)} + \dot{Z}_C^{(n)};\ \dot{k}_{12}^{(n)} = \dot{k}_{31}^{(n)} = \dot{k}_{23}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_B^{(n)} + a\,\dot{Z}_C^{(n)};\ \dot{k}_{31}^{(n)} = \dot{k}_{12}^{(n)} = \dot{k}_{32}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a\,\dot{Z}_B^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_C^{(n)};$$

Съставките с права, обратна и нулева последователност на падовете на напрежение $\Delta\dot{U}_s$, (s=1,2,0) в участъците с надлъжна несиметрия се представят с:

(2.22) $$\begin{bmatrix}\Delta\dot{U}_0\\ \Delta\dot{U}_1\\ \Delta\dot{U}_2\end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}\dot{k}_{11}^{(n)} & \dot{k}_{12}^{(n)} & \dot{k}_{31}^{(n)}\\ \dot{k}_{12}^{(n)} & \dot{k}_{22}^{(n)} & \dot{k}_{23}^{(n)}\\ \dot{k}_{31}^{(n)} & \dot{k}_{32}^{(n)} & \dot{k}_{33}^{(n)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}.$$

- С отчитане на съпротивленията $\dot{Z}_{AB}^{(n)}, \dot{Z}_{CA}^{(n)}, \dot{Z}_{BC}^{(n)}$:

Изразите за падовете на напрежението $\Delta\dot{U}_i$,(i=A,B,C) в участъците с надлъжна несиметрия са:

(2.23) $$\Delta\dot{U}_A = \dot{I}_A\,\dot{Z}_A^{(n)} + \dot{I}_B\,\dot{Z}_{AB}^{(n)} + \dot{I}_C\,\dot{Z}_{CA}^{(n)};\ \Delta\dot{U}_B = \dot{I}_A\,\dot{Z}_{AB}^{(n)} + \dot{I}_B\,\dot{Z}_B^{(n)} + \dot{I}_C\,\dot{Z}_{BC}^{(n)};\ \Delta\dot{U}_C = \dot{I}_A\,\dot{Z}_{CA}^{(n)} + \dot{I}_B\,\dot{Z}_{BC}^{(n)} + \dot{I}_C\,\dot{Z}_C^{(n)}.$$

Съставките с права, обратна и нулева последователност на падовете на напрежение $\Delta\dot{U}_s$, (s=1,2,0) в участъците с надлъжна несиметрия се представят с:

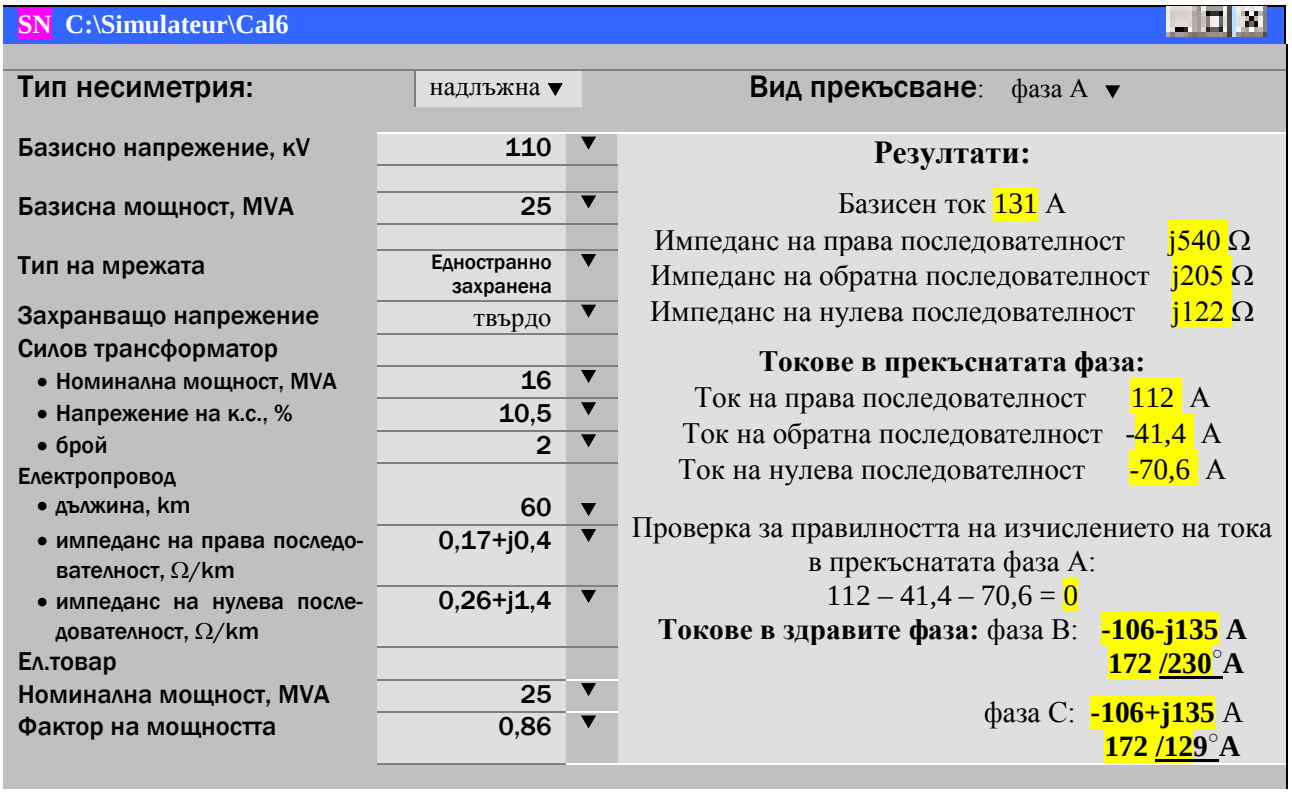
(2.24) $$\begin{bmatrix}\Delta\dot{U}_0\\ \Delta\dot{U}_1\\ \Delta\dot{U}_2\end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}\dot{d}_{11}^{(n)} & \dot{d}_{12}^{(n)} & \dot{d}_{13}^{(n)}\\ \dot{d}_{21}^{(n)} & \dot{d}_{22}^{(n)} & \dot{d}_{23}^{(n)}\\ \dot{d}_{31}^{(n)} & \dot{d}_{32}^{(n)} & \dot{d}_{33}^{(n)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix},$$

където $\dot{d}_{11}^{(n)} = \dot{d}_{22}^{(n)} = \dot{d}_{33}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + \dot{Z}_B^{(n)} + \dot{Z}_C^{(n)} + 2\dot{Z}_{\xi M}^{(n)};\ \dot{d}_{12}^{(n)} = \dot{d}_{31}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_B^{(n)} + a\,\dot{Z}_C^{(n)} - \dot{Z}_{\lambda M}^{(n)};$

$$\dot{d}_{13}^{(n)} = \dot{d}_{21}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a\,\dot{Z}_B^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_C^{(n)} - \dot{Z}_{\mu M}^{(n)};\ \dot{d}_{32}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a\,\dot{Z}_B^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_C^{(n)} + 2\dot{Z}_{\mu M}^{(n)};\ \dot{d}_{23}^{(n)} = \dot{Z}_A^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_B^{(n)} + a\,\dot{Z}_C^{(n)} + 2\dot{Z}_{\lambda M}^{(n)};$$

$$\dot{Z}_{\xi M}^{(n)} = \dot{Z}_{AB}^{(n)} + \dot{Z}_{CA}^{(n)} + \dot{Z}_{BC}^{(n)};\ \dot{Z}_{\lambda M}^{(n)} = a\,\dot{Z}_{AB}^{(n)} + a^2\,\dot{Z}_{CA}^{(n)} + \dot{Z}_{BC}^{(n)};\ \dot{Z}_{\mu M}^{(n)} = a^2\,\dot{Z}_{AB}^{(n)} + a\,\dot{Z}_{CA}^{(n)} + \dot{Z}_{BC}^{(n)}.$$

В блок VILI2 от фиг.2.3 се преизчисляват напреженията във възлите при наличие на смущения от режимен характер. Резултатите от проведените изчисленията за разпределителна електропреносна система, състояща се от захранване с константно (твърдо) напрежение 110 kV, електропровод с прекъсване на един фазов проводник, подстанция с 2 паралелно работещи трансформатора и товар, са показани на фиг.2.8.



Фиг.2.8. Изчисляване на токовете при непълнофазен режим в електрическа мрежа за ВН

2.5.ИЗВОДИ ПО ВТОРА ГЛАВА

- Разработената методика и софтуер, предназначени за електрически изчисления и симулиране на нормалните и аварийните режимите е полезна за изчисляване на настройките на УРЗА в разпределителните мрежи с отчитане на възникващите смущения.
- Адаптацията на методиката за изследване на несиметрични режими в разпределителни мрежи за целите на УРЗА дава възможност да се следят несиметриите и неуравновесеността по ток и напрежение, а настройката да се съобразява с реалната възможност от наличие на смущаващи въздействия по време на несиметрия или неуравновесеност.
- Адаптираната разработена методика за анализ на непълнофазните режими с отчитане на възникващите смущения позволява да се определят настройките на УРЗА.

Глава трета

3. СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА НА ВЯТЪРНИ И МАЛКИ ВОДНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЦЕНТРАЛИ

Целта на изследването в трета глава е да се поясни разликата между излишни, лъжливи и неправилни заработвания на защитите, да се избере критерий за оценка на ефективността на функционирането им, да се представи методика за определяне на показателите за надеждност на цифровите защити и да се разкрият най-честите причини за поява на смущения и излишни изключвания на устройства за защита и автоматика във вятърни централи и малки ВЕЦ.

3.1. КРИТЕРИИ ЗА ЕФЕКТИВНОСТ НА ФУНКЦИОНИРАНЕ НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА

3.1.1. ФУНКЦИИ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА

Незпълнението на зададени функции при експлоатация на устройствата за релейна защита понякога се дължи на грешките на органите, които предизвикват откази на нейните елементи. Към *отказите за заработване* попадат случаите, когато е подаден имулс за изключване на защитата, но то не е реализирано. *Излишното заработване* се дефинира като повреда или ненормален режим, но изискванията са защитата да не заработва. *Лъжливо заработвание* се наблюдава когато защитата заработва при липса на повреда в системата. Понякога излишните и лъжливите заработвания се обобщават като неправилни заработвания.

Към свойствата на УРЗА се отнася ефективността на нейното функциониране. Класическото определение за ефективност на функционирането на сложни системи се състои в изпълнението на граничен брой функции, всяка от които с определен ефект. За УРЗА към това определение се конкретизира, че ефектът за изпълнение на функциите намалява поради крайното време за заработване на защитата.

Ефективността на функционирането на УРЗА при къси съединения (к.с.) може да се дефинира като изпъленние на трите функции: заработване при вътрешно к.с., незаработване при външни к.с. и незаработване в режим без к.с..

3.1.2. КРИТЕРИИ ЗА ЕФЕКТИВНО ФУНКЦИОНИРАНЕ НА ЗАЩИТАТА

Под ефективност на защитна система се разбира нейната способност да решава поставена задача. За анализ на защитна система е необходимо точно да се формулира решаваната задача и да се изберат критериите за нейното ефективно функциониране.

Критериите за ефективно функциониране на защитата могат да бъдат икономически и надеждностни.

Икономическите критерии се свеждат до търсене на минимум на вложените инвестиции за монтиране на защитата, сумарните експлоатационните разходи за работа на защитните устройства и разходите от изключвания на защитата.

По подходящи за микропроцесорните защити са надеждностните критерии: неефективност на функционирането, техническо несъвършенство и надеждност на фунционирането. Като критерий за надеждност при сравнение на различни варианти на микропроцесорните системи за защита се използват показателите:

- коефициент на неготовност за заработване на защитата при вътрешни к.с.
- коефициент на неготовност за заработване на защитата при външни к.с.
- параметър на потока лъжливи заработвания в режим без к.с.

Посочените критерии са установени въз основа на изискванията за правилно функциониране на УРЗА. Тези изисквания включват:

- безотказно заработване на УРЗА при повреда в защитавания обект;
- незаработване при к.с. извън защитавания обект;
- незаработване в нормален режим на работа на обекта.

Обобщение:

Ефективността на функционирането на технически системи се състои в изпълнението на ограничен брой функции, всяка от които има определен ефект. За цифровите защити към това определение се конкретизира, че ефектът за изпълнение на функциите намалява, поради крайното време за заработване на защитата.

Изходният ефект от действието на защитите се състои в удовлетворяване на изискването за непрекъснатост на електроснабдяването.

Ненадеждната работа на микропроцесорните защити може да предизвика прекъсване или нарушаване на електроснабдяването на потребителите и да доведе до системни аварии с тежки икономически последствия.

3.2.СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА НА ВЯТЪРНИ ЦЕНТРАЛИ

3.2.1.ОСНОВНИ И ВТОРИЧНИ ЗАЩИТИ ВЪВ ВЯТЪРНИ ЦЕНТРАЛИ

Релейните защити на вятърните централи са настроени да реагират на всички ненормални режими при тяхната експлоатация. Настройката на релейните защити не отчита всички възможности за поява на смущения в защитаваните вериги. Целта на изследването е да се разкрият най-честите причини за поява на смущения и излишни изключвания на устройства за защита и автоматика във вятърни централи.

Изборът на защитите във вятърните централи се съобразява с типа на ветрогенератора:

- За синхронни и асинхронни генератори със самовъзбуждане:
  - за НН:
    - основна защита от: токово претоварване; липса на товар; свръхвисока скорост;
    - вторична защита: земна защита на статора; земна защита на ротора (само за синхронни генератори); защита от понижено напрежение; претоварване по напрежение; загуба на самовъзбуждане; защита от обратна мощност;
  - за СН:
    - основна защита: земна защита на статора; токово претоварване; липса на товар; свръхвисока скорост; загуба на самовъзбуждане;
    - вторична защита: земна защита на ротора (само за синхронни генератори); защита от понижено напрежение; претоварване по напрежение; защита от обратна мощност.
- Асинхронни генератори
  - за НН:
    - основна защита от: токово претоварване; липса на товар; свръхвисока скорост;
    - вторична защита: защита от понижено напрежение; претоварване по напрежение; защита от обратна мощност;
  - за СН:
    - основна защита: токово претоварване; липса на товар; свръхвисока скорост;
    - вторична защита: земна защита на статора ; защита от понижено напрежение; претоварване по напрежение; защита от обратна мощност; асиметрия на токовете.

3.2.2. НАСТРОЙКИ И АНАЛИЗ НА ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА ЗАЩИТА НА ВЯТЪРНИТЕ ЦЕНТРАЛИ

Настройките на прекъсвача в генераторната верига са показани в табл.3.1, където са дадени долната и горната граници на напрежението и честотата, претоварването по ток, стойностите за изключване на напрежението, съответните оперативно време и времезакъснение.

Проведени са наблюдения за изключванията на УРЗА на вятърни централи, изградени на три обекта в района на гр. Сливен и Ямбол за периода 2014 ÷ 2017 година. Резултатите са представени в табл.3.2.

Таблица 3.1. Настройки на защитите

№	Тип на защитата	Граници на регулирането		Време	
		Основен елемент	Напрежение	Оперативно време, ms	Закъс-нение,s
1	Долна граница на напрежението	0,7÷0,85 о.е.	-	50÷150	0÷1,5
2	Горна граница на напрежението	1,1÷1,2 о.е.	-	50÷150	0÷5
3	Долна граница на честотата	-1÷2,5 Hz	0,7÷1,2 о.е.	80÷150	0÷1
4	Горна граница на честотата	1÷2,5 Hz	0,7÷1,2 о.е.	80÷150	0÷1
5	Претоварване по ток	0,5÷2 о.е.	-	50÷150	0÷5
6	Изключване на напрежението	0,2÷2 о.е.	-	50÷150	0÷1,5

Таблица 3.2. Изключвания на УРЗА на вятърни централи

Обект	Изключвания от УРЗА, %				
	По причини от механичен характер	По причини от електрически характер	Повреди в системата за автоматика	Превишения на максималната скорост на вятъра	Излишни заработ-вания
1	37	25	20	6	12
2	32	23	24	7	14
3	28	36	19	6	11

Излишните заработвания на УРЗА на вятърните централи за трите обекта са 2 пъти повече от изключванията поради превишение на максималната скорост на вятъра.

Причините за изключванията на УРЗА на вятърните централи на разглежданите три обекта са дадени в табл.3.3.

Таблица 3.3. Причини за изключванията на УРЗА на вятърните централи

Обект	Преми-наване на долната граница на напреже-нието, %	Преми-наване на горната граница на напреже-нието, %	Преми-наване на долната граница на честотата, %	Преми-наване на горната граница на честотата, %	Претовар-ване по ток, %
1	11	58	8	11	12
2	6	63	7	10	14
3	7	28	9	12	44

Най-големият брой на изключванията на вятърните централи на обект 1 и обект 2 се дължи на преминаване на горната граница на настройката за напрежение, а на обект 3 – поради претоварване по ток.

3.2.3. ПРЕВИШЕНИЯ НА НАПРЕЖЕНИЯТА НАД НАСТРОЕНАТА СТОЙНОСТ ЗА ЗАРАБОТВАНЕ НА ЗАЩИТАТА

А. Очакван брой превишения над зададено ниво на напрежението в разпределителни мрежи за СН

Нивото на напрежението в разпределителни мрежи за СН, защитавана от УРЗА е стационарен случаен процес $u(t)$. Нека v_a^+ е очакваният брой пресичания на нивото $u = a$ с положителен наклон, а $\dot{u}$ е ъгловият коефициент. Очакваният брой превишения v_a^+ се изразява с

(3.12) $$v_a^+ = \int_0^\infty \dot{u}\,.\,p(a,\dot{u})d\dot{u}$$

Тъй като процесът има нормално разпределение, се записва

(3.13) $$v_a^+ = \frac{1}{2\pi}\frac{\sigma_{\dot{u}}}{\sigma_u}\exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_{\dot{u}}^2}\right).$$

Б. Вероятност за превишаване на напрежението над определено ниво

Вероятността $P(S > a|T)$, че в интервал от време T, функцията на превишаване на напрежението $S(t)$ ще надвиши поне веднъж нивото a, се определя, като се ползва израз (3.12). Намира се броят на превишенията $v_a^+(t)dt$ за интервал dt и след това се интегрира в границите на интервала T

(3.14) $$N(a|T) = \int_0^T dt \int_0^\infty \dot{u}\, p(a, \dot{u}; t) d\dot{u}$$

$N(a|T)$ е намаляваща функция на a. Нивото $a_0\,(T)$, при което очакваният брой превишения е равен на единица или $a_0\,(T)$ е корен на уравнението $N(a|T) = 1$.

За $a \leq a_0$ се получава $N(a|T) \geq 1$. Тогава може да се смята, че превишението на нивото a е достоверно събитие, така че търсената вероятност $P(S > a|T)$ е равна на единица. За $a > a_0$ средният брой превишения е по-малък от единица. Може да се приеме, че той дава търсената вероятност $P(S > a|T)$. Приема се

(3.15) $$P(S > a|T) \approx \begin{cases} 1 \text{ при } a \leq a_0(T) \\ N(a|T) \text{ при } a > a_0(T) \end{cases}$$

Превишенията на напрежението в електроразпределителните мрежи за СН по данни от експлоатацията са дадени в табл.3.4.

Таблица 3.4. Продължителност на превишенията на напрежението по данни от измервания

Продължителност на превишението на напрежението, s	Наблюдения за превишение на напреженията, %
до 5	30
над 5	70

От табл.3.4 се вижда, че около 30% от превишенията на напрежението са с продължителност до 5 s. Изборът на настройка на максимално напреженовата защита трябва да се съгласува с наличието на защитни съоръжения от атмосферни пренапрежения (вентилни отводи) и очакваният брой превишения на напрежението спрямо диапазона на настройка да се отчита при търсене на компромис между възможността за “загрубяване” на защитата и последиците от това.

Обобщение:

Най-честата причина за смущения, предизвикващи излишни изключвания на УРЗА във вятърните централи, са превишенията на напреженията над настроената стойност за заработване на защитата.

Около 30% от превишенията на напрежението са с продължителност до 5 s. Изборът на настройка на максимално напреженовата защита трябва да се съгласува с наличието на защитни съоръжения от атмосферни пренапрежения.

Очакваният брой превишения на напрежението спрямо диапазона на настройка на напреженовата защита може да се отчита при настройките, а също при търсене на компромис между възможността за “загрубяване” на защитата и последиците от това.

3.2. СМУЩАВАЩИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВАТА ЗА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА НА МАЛКИ ВОДНИ ЦЕНТРАЛИ

3.3.1. ЗАЩИТИ В МАЛКИ ВОДНИ ЦЕНТРАЛИ

За генератори с напрежение 3÷6 кV с мощност от 1 до 5 MW се предвиждат релейни защити от следните видове повреди и ненормални режими:

- от многофазни к.с. в статорната намотка на генератора и неговите изводи;
- от ЕЗС в статорната намотка на СГ и в неговите изводи, както и от двойни земни съединения, едно от които възниква в статорната намотка, а второто във външната мрежа;
- от свръхтокове в статорната намотка, предизвикани от външни к.с.
- от токове в статорната намотка, предизвикани от симетрично претоварване.

3.3.2. АНАЛИЗ НА ИЗКЛЮЧВАНИЯТА НА ЗАЩИТИТЕ НА ХИДРОГЕНЕРАТОРИ

Проведени са наблюдения за изключванията на УРЗА на малки водни централи, изградени на 3 обекта в района на гр. Смолян за периода 2014 ÷ 2017 година. Резултатите са представени в табл.3.5.

Таблица 3.5. Изключвания на УРЗА на малки водни централи

Обект	Изключвания от УРЗА, %			
	По причини от механичен характер	По причини от електрически характер	Повреди в системата за автоматика	Излишни заработвания
1	34	36	14	16
2	32	26	23	19
3	33	37	16	14

Излишните заработвани на УРЗА на водните централи за трите обекта са съизмерими с изключванията поради повреди в системата за автоматика.

Причините за изключванията на УРЗА на водните централи на разглежданите три обекта са дадени в табл.3.6.

Таблица 3.6. Причини за изключванията на УРЗА на водните централи

Обект	Минимално напреженова защита, %	Максимално напреженова защита, %	Претоварване по ток, %
1	9	61	30
2	7	55	37
3	9	52	39

Най-големият брой на изключванията на водните централи на обекти 1, 2 и 3 се дължи на преминаване на горната граница на настройката за напрежение.

3.4. ИЗВОДИ ПО ТРЕТА ГЛАВА

- Най-честата причина за смущения, предизвикващи излишни изключвания на УРЗА във вятърните и малките водни централи, са превишенията на напреженията над настроената стойност за заработване на защитата.
- Очакваният брой превишения на напрежението спрямо диапазона на настройка на напреженовата защита може да се отчита при настройките, я също при търсене на компромис между възможността за “загрубяване” на защитата и последиците от това.

Глава четвърта

4. ОЦЕНКА НА ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВА ЗА ЗЕМНИ ЗАЩИТИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С МАЛЪК ТОК НА ЗЕМНО СЪЕДИНЕНИЕ

4.1. ВЪВЕДЕНИЕ

Експлоатационният опит показва, че еднофазните земни съединения (ЕЗС) в разпределителните мрежи за СН се проявяват като еднократни импулсни разряди с последващо възстановяване на якостта на изолацията, пробиви, устойчиво метално или

дъгово земно съединение и многократно повтарящи се импулсни разряди в изолацията или дъгово земно съединение.

Повторните импулсни разряди в кабелни компенсирани мрежи могат да възникнат през интервали до 25 ms.

Дъговите земни съединения се наблюдават след един или няколко импулсни разряди при повреда на изолацията. Възможни са повторни дъгови земни съединения. Продължителността времето за горене дъгата е 20÷40 ms с безтокови паузи от 40÷50 ms до няколко часа. Вероятността за повторни дъгови земни съединения нараства в мрежи с изолиран звезден център, а минималните безтокови паузи намаляват до 10 ms.

В експлоатацията все още съществуват електроенергийни обекти (ЕЕО) в разпределителните мрежи, които не са съоръжени с устройства за селективна защита от ЕЗС. Тези обекти имат само контрол на изолацията, който се изразява в неселективна сигнализация от ЕЗС по напрежение с нулева последователност (НП).

Трасетата на въздушните електропроводи (ВЕ) преминават през терени с различни климатични условия и райони с повишена или незначителна мълниеносна дейност. Статистиката показва, че броят на изключванията от УРЗА има вероятностен характер. Основната причина за изключване на въздушните електропроводи в разпределителните мрежи са попаденията от мълнии. Големината на тока на мълнията се променя в доста широки граници. Влияние върху нормалното функциониране на УРЗА се наблюдава при:

- падане на мълния близо до ВЕ;
- падане на мълния върху конзолата на стоманорешетъчните стълбове;
- падане на мълния върху проводник на ВЕ.

Интерес представлява въпроса за поведението на УРЗА в разпределителни мрежи с малък ток на земно съединение при попадения на мълния върху или в близост до ВЕ. Възможно ли е да се избегнат излишни изключвания на защитата от попадения на мълнии при подходяща пренастройка на защитите? Има ли нужда от импулсна защита в разпределителните мрежи?

4.2. ОСОБЕНОСТИ НА ФУНКЦИОНИРАНЕТО НА УСТРОЙСТВА ЗА ЗЕМНИ ЗАЩИТИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С МАЛЪК ТОК НА ЗЕМНО СЪЕДИНЕНИЕ

Използваните защити от ЕЗС в разпределителни мрежи за СН с малък ток на земно съединение са:

- посочна защита за мощност с НП;
- земна защита, реагираща на висшите хармоници (в.х.) в тока с НП при ЕЗС в мрежата;
- земна защита, действаща на началния знак на мощността с НП по време на преходния процес;
- земна защита, действаща на полярността на тока и напрежението в първия полупериод на преходния процес при ЕЗС – защита TRER.

4.2.1. ПОСОЧНА ЗАЩИТА ЗА МОЩНОСТ С НУЛЕВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ

Защитата се използва в едностранно захранена мрежа, когато токовата земна защита няма необходимата чувствителност. Това е мрежа с радиални изводи, където собствените капицитивни токове на отделните линии са съизмерими със сумарния капацитивен ток на неразвита мрежа. Защитата е приложима в затворените мрежи, когато посоката на тока при ЕЗС е от определящо значение за намиране на повредената линия. В принципа е заложена възможността защитата да не се отстройва от собствения капацитивен ток на линията. В некомпенсирани мрежи защитата реагира на мощността с НП, създавана от капацитивния ток. Посоката на тока и мощността на повредената и

непровредената линия са противоположни. По знака на мощността на посочното реле може да се определи повредената линия.

Защитата е неприложима за недокомпенсация на капацитивния ток, тъй като реактивният ток в повредената линия и капацитивният ток в неповредената част на мрежата имат едвакви посоки.

Посочната защита е чувствителна и почти не се влияе от преходното съпротивление в мястото на повредата.

4.2.2. ЗАЩИТА, РЕАГИРАЩА НА ВИСШИТЕ ХАРМОНИЦИ В ТОКА С НУЛЕВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ

Във фазите на мрежата винаги има съставки на в.х., предизвикани от наличието на намагнитващите токове във всички силови трансформатори, нелинейни товари във вид на топилни пещи, несинусоидални е.д.н. в системата и генераторите, дъгата при ЕЗС и др. В компенсираните мрежи се компенсира само основния хармоник на капацитивния ток, а в.х. остават некомпенсирани. При възникване на ЕЗС $K_з^{(1)}$ разпределението на токовете на в.х. е същото, както капацитивния ток на ЕЗС.

Селективното определяне на повредената линия се реализира чрез:

- съпоставяне на нивата на в.х. в тока с НП на повредения и неповредения извод - способ на относителното замерване;
- сравняване на нивото на в.х. в тока с НП със зададената стойност на настройката за заработване на защитата - способ на абсолютното измерване.

Преходното съпротивление в мястото на ЗС влияе върху големината на в.х. По тази и други причини устройството се използва като резервна защита на сигнал.

4.2.3. ЗАЩИТА, ДЕЙСТВАЩА НА НАЧАЛНИЯ ЗНАК НА МОЩНОСТТА С НУЛЕВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ ПО ВРЕМЕ НА ПРЕХОДНИЯ ПРОЦЕС

В началния момент на ЕЗС възниква затихващ колебателен преходен процес, като повредената фаза разрежда своя капацитет, а капацитетите на другите две фази се дозареждат и тяхното напрежение нараства до междуфазните стойности.

Защитата реагира на посоката на мощността в първия полупериод на преходния процес $p_0 = u_0 i_0$, където u_0, i_0 са съответно напрежението и тока на вълните с НП. Тя намира приложение в електрически мрежи за СН с различна кофигурация: радиални или радиални с няколко последователни участъка, затворени и паралелни линии, независимо от режима на ЗЦ.

Посочната защита използва принципа за контрол на посоката на разпространение на електромагнитните вълни в контура фаза-земя, които възникват в началния етап на преходния процес при ЕЗС.

Използването на вълновия начален стадий на преходния процес при ЕЗС дава много добри условия за селективност: фазните съотношения не се изкривяват и слабо зависят от конфигурацията на мрежата, от преходното съпротивление и от съпротивлението на дъгата, което е с малка стойност.

В едноконтурни мрежи и на паралелни линии е необходимо да се постави защита от двете страни на линиите. Повреденият извод се определя по заработването на защитата от двата му края.

Поведение на защитата, действаща на началния знак на мощността с НП, при атмосферни пренапрежения

Възможността за възникване на атмосферни пренапрежения в разпределителните мрежи не се отчита при настройката на защитата, действаща на началния знак на мощността с НП. Разглеждат се ВЕ без мълниезащитни въжета, каквито са електропроводите за СН.

Изчислените стойности на индуктираните напрежения при ток на мълнията от 50 кА до 100 кА и разстояние от ВЕ до мястото на падане на мълнията от 50 m до 500 m варират в границите от 25 kV до 540 kV (табл.4.1).

Таблица 4.1. Индуктирано напрежение при падане на мълния в близост до ВЕ

Разстояние от ВЕ до мястото на падане на мълнията, m	Ток на мълнията, кА	Индуктирано напрежение, kV
50	50 100	270 540
100	50 100	135 270
500	50 100	27 54

Изчислените пренапрежения във ВЕ за СН без мълниезащитни въжета при падане на мълния върху стълба за ток на мълнията от 50 kA до 100 kA са в границите от 380 kV до 580 kV. Тези стойности на атмосферните пренапрежения ще предизвикат директно пробив поради недостатъчна електрическа якост на изолацията. При токове на мълнията под 50 kA, независимо от настройката, защитата винаги ще заработва при падане на мълния върху или в близост до ВЕ. Защитата не трябва да се монтира в райони с интензивна мълниеносна дейност, защото ще заработва излишно от смущения при попадения на мълния върху ВЕ или близо до него. По тази причина се предпочита използването на защитата при кабелните линии.

Защитата може да заработва неправилно при ЕЗС в схемите на сборни шини за СН, към които са включени само две линии. Изборът на параметрите за заработване на измервателните органи на защитата се извършва по критерия за ограничаване на излишните изключвания при външни ЕЗС. Изборът на най-голямата стойност на тока на заработване води до понижаване на чувствителността на защитата. Създават се условия за произволно заработване на защитата за изключване на други линии при изменения на полярностите на тока и напрежението при развитие на преходния процес при ЕЗС, особенно при къси линии с дължина до 1÷2 km. Ето защо за настройка трябва да се използва най-ниската стойност на заработване на защитата по ток, за да се повиши селективността.

4.2.4. ЗЕМНА ЗАЩИТА, ДЕЙСТВАЩА НА ПОЛЯРНОСТТА НА ТОКА И НАПРЕЖЕНИЕТО В ПЪРВИЯ ПОЛУПЕРИОД НА ПРЕХОДНИЯ ПРОЦЕС ПРИ ЕДНОФАЗНО ЗЕМНО СЪЕДИНЕНИЕ

Защитата използва параметрите на преходния процес и реагира на полярностите на първата полувълна на U_0 и I_0 $(+I_0, -I_0, +U_0, -U_0)$.

Принципът на действие на защитата се основава на сравняване на знаците на първите полувълни на тока и напрежението с НП в началото на ЗС. При възникване на повреда се подават сигнали от филтрите за ток и напрежение с НП, които постъпват на входовете на двата монтирани тригера, които заработват при превишаване на $3I_0$ с големина $150 \div 300$ mA и $3U_0$ - от $15 \div 35$ V и се извършва запаметяване на знаците на първите полувълни. За повишаване на чувствителността по канала на напрежението в случай, когато първите пикове на U_0 са малки, след заработване на токовите органи, автоматично се понижава настройката на пусковите органи на напрежение до 3 V.

Импулсната защита в разпределителните мрежи за СН ще изключва излишно при попадения на мълнии в близост до ВЕ.

4.3. ИЗВОДИ ПО ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

- Посочната защита за мощност с НП е неприложима за недокомпенсация на капацитивния ток ($I_L < 3I_{0C\Sigma}$), тъй като реактивният ток в повредената линия и капацитивният ток в неповредената част на мрежата имат еднакви посоки.
- Защитата, реагираща на в.х. в тока с НП, се използва като резервна и действаща на сигнал, тъй като преходното съпротивление в мястото на ЕЗС влияе върху големината на хармониците.
- Защитата, действаща на началния знак на мощността с НП, не е подходяща за райони с интензивна мълниеносна дейност, защото ще заработва излишно от смущения при попадения на мълния върху въздушния електропровод или близо до него. Тази защита може да се използва при кабелните линии.
- Защитата, действаща на началния знак на мощността с НП, може да заработва неправилно при ЕЗС в схемите на сборни шини за СН, към които са включени само две линии. Изборът на параметрите за заработване на измервателните органи на защитата се извършва по критерия за ограничаване на излишните изключвания при външни ЕЗС.

Глава пета

5. ИЗСЛЕДВАНЕ ДИНАМИКАТА НА ПРОЦЕСА НА ВКЛЮЧВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ С ПРОГРАМНИЯ ПРОДУКТ MATLAB

5.1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електромагнитите са широко използвани като електромагнитни задвижващи устройства в комутационните апарати за ниско напрежение. При проектирането и изследването на всеки един електромагнит е нужно да бъдат определени неговите динамични характеристики. Ако електромагнитът се разгледа като изпълнителен орган към защитата от пренапрежения във вятърни централи, при рязко повишаване на скоростта на въртене на ветрогенератора, от което се повишава напрежението на клемите му, то е необходимо бързото му понижаване. Правилното оразмеряване на електромагнита с основно изискване за бързодействие и отчитане на особеностите на ветрогенератора би довело до намаляване на излишните заработвания на защитата.

Целта на изследването в пета глава е да се разработи компютърен модел на постояннотоков електромагнит в модула SIMULINK интегриран в програмния продукт MATLAB, с чиято помощ да бъдат изследвани динамичните характеристики на електромагнита.

5.2. МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

Моделирането на динамичните характеристики е свързано със съвместното решаване на три основни задачи за: електрическа верига; електромагнитно поле; механично преместване.

При включване намотката на електромагнита към източник на постоянно напрежение, уравнението за равновесие на напрежението в намотката е:

(5.1) $$U = Ri + \frac{d\psi}{dt},$$

където U е напрежението на източника, i - токът в намотката, R - активното съпротивление на намотката; $\frac{d\psi}{dt}$ индуктираното противоелектродвижещо напрежение в намотката.

Котвата на разглеждания електромагнит се движи линейно и нейното движението може да се опише с уравнението за равновесието на силите, които ù действат:

(5.2) $$F_e = m\frac{d^2x}{dt^2} + k_1\frac{dx}{dt} + k_2x + F_н,$$

където F_e – електромагнитната сила, действуваща върху котвата, m – масата на подвижната система, k_1 – коефициент на демпфиране, k_2 – коефициент на твърдост на възвратната пружина, $F_н$ – начална сила на възвратната пружина.

Противодействащата сила пропорционална на скоростта на движение на котвата може да се пренебрегне и тогава уравнение (5.2) добива вида:

(5.2a) $$F_e = m\frac{d^2x}{dt^2} + kx + F_н,$$

Електромагнитната сила, която действа на котвата се определя от уравнението:

(5.3) $$F_e = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dx},$$

където i – токът, който протича през намотката и dL/dx е изменението на индуктивността при преместването на котвата.

Динамичните характеристики на електромагнита могат да бъдат определени чрез съвместното решаване на уравнения (5.1), (5.2a) и (5.3).

SIMULINK е графична среда в MATLAB, позволяваща симулиране на динамични системи, които се описват като набор от линейни или нелинейни диференциални или диференчни уравнения.

Числени изследвания

Изследванията са направени за електромагнит от електрически контактор тип LP1K0610BD. Основните параметри на електромагнита са: съпротивление на намотката R = 200 Ω, номинално напрежение U = 24 V и ход на котвата x = 3.6 mm.

Опитно са определени стойностите на началната сила и коефициента на твърдост на възвратната пружина, които са съответно $F_{нач}$ = 0,2 N и k = 0,40 N/mm.

5.3.ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИНДУКТИВНОСТТА НА НАМОТКАТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТА ПРИ ДВИЖЕНИЕТО НА КОТВАТА СЪС СИГНАЛ ГЕНЕРАТОР И ОСЦИЛОСКОП

Индуктивността на намотката в зависимост от положението на котвата е определена експериментално със сигнал генератор и осцилоскоп, като резултатите от изследването са дадени в табл.5.1.

Функцията L(x) ще бъде представена като полином от четвърта степен:

(5.4) $$L(x) = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5$$

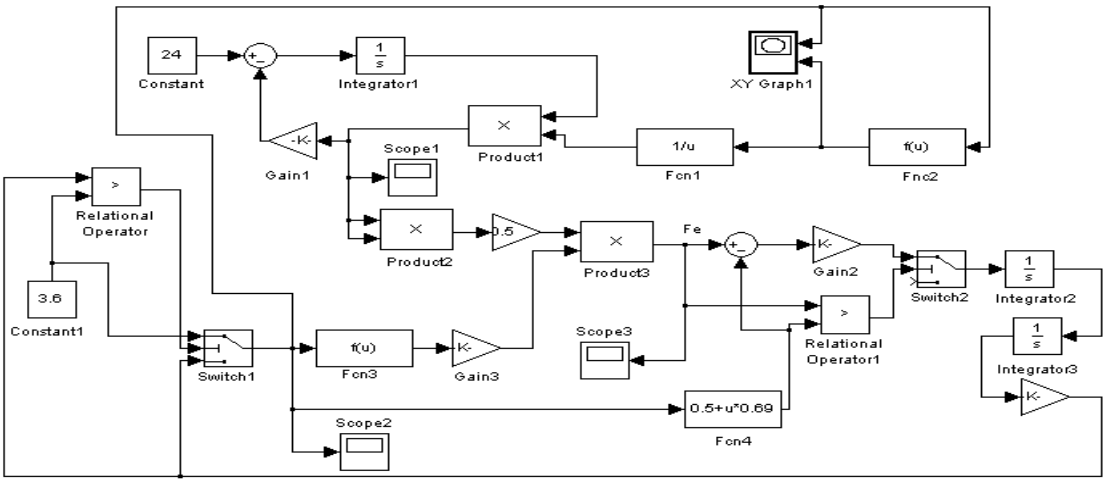
Коефициентите са съответно:

$$p_1 = -0,0231, p_2 = 0,1881, p_3 = -0,2076, p_4 = 0,2680, p_5 = 2,829$$

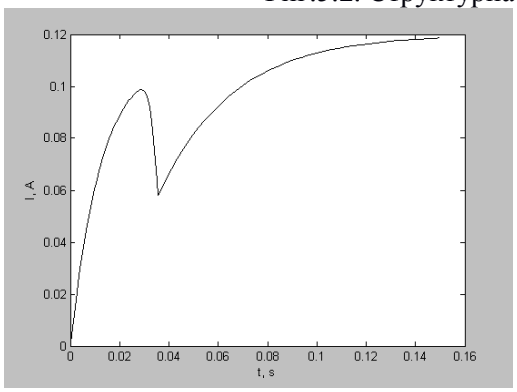
Таблица 5.1 Индуктивност на намотката-експериментално определена

№	x, mm	L, H
1	0	2.80
2	0.6	2.95
3	1.2	3.15
4	1.8	3.50
5	2.4	4.10
6	3.0	4.95
7	3.6	6.0

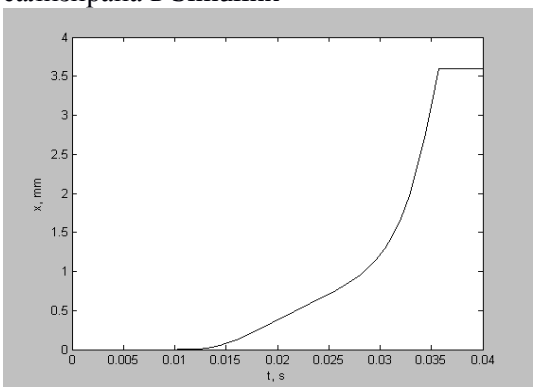
Структурната схема на уравнения (5.1), (5.2a) и (5.3) реализирани в графичната среда SIMULINK е дадена на фиг.5.2.



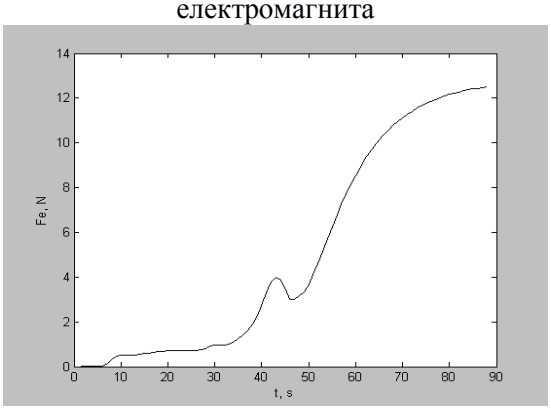
Фиг.5.2. Структурна схема реализирана в Simulink



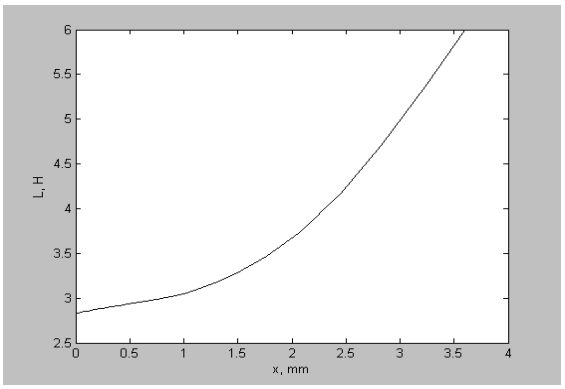
Фиг.5.3. Изменение на тока през намотката на електромагнита



Фиг.5.4. Преместване на котвата



Фиг.5.5. Изменение на електромагнитна сила



Фиг.5.6. Изменение на индуктивността на намотката

На фиг.5.3 е показано изменението на тока, който протича през намотката на електромагнита във функция на времето. На фиг.5.4 е дадено преместването на котвата във функция на времето получено при симулацията. На фиг.5.5 е дадено изменението на електромагнитната сила при протичането на преходния процес на включване на електромагнита. На фиг.5.6 е дадено изменението на индуктивността на намотката при движението на котвата на електромагнита.

5.4.ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИНДУКТИВНОСТТА НА НАМОТКАТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТА ПРИ ДВИЖЕНИЕТО НА КОТВАТА ЧРЕЗ ЗАПИС НА ТОКА СЪС ЗАПОМНЯЩ ОСЦИЛОСКОП

В табл.5.2. е дадена индуктивността на намотката на електромагнита определена числено от заснетите с запомнящ осцилоскоп диаграми за тока.

Таблица 5.2. Индуктивност на намотката-числено определена

№	x, mm	L, H
1	0	2.73
2	0.6	3
3	1.2	3.41
4	1.8	3.82
5	2.4	4.09
6	3.0	4.64
7	3.6	4.78

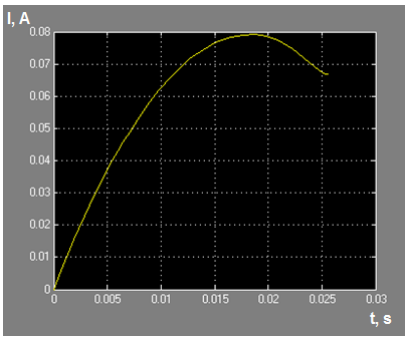
Ако се направи сравнение между стойности за индуктивността от табл.5.1. и табл.5.2, се установява, че при затворена котва стойностите са по-малки. Стойностите в табл.5.1 са определени статично, а тези в табл.5.2. отразяват влиянието на вихровите токове и поради това при затворена котва имаме по-малка стойност на индуктивността.

В създадения в SIMULINK модел на електромагнита функцията L(x) от табл.5.2. е представена като полином от четвърта степен:

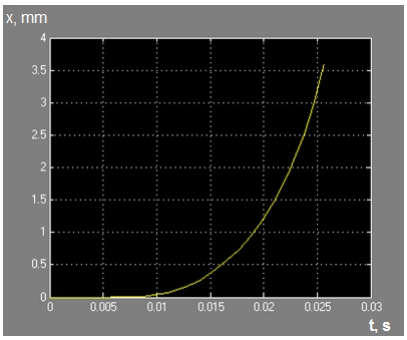
$$L(x) = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5$$

Стойностите на коефициентите са съответно:

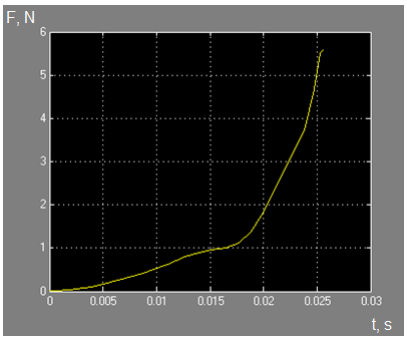
$$p_1 = -0{,}0155, p_2 = 0{,}0768, p_3 = -0{,}0679, p_4 = 0{,}5494, p_5 = 2{,}7192.$$



Фиг.5.7. Ток през намотката на електромагнита



Фиг.5.8. Преместване на котвата



Фиг.5.9. Електромагнитна сила

На фиг.5.7 е показан тока, който протича през намотката на електромагнита при включването му получен от компютърното моделиране. На фиг.5.8 е дадено преместването на котвата във функция на времето получено при симулацията. На фиг.5.9 е дадена електромагнитната сила при включване на електромагнита получена от компютърния модел.

Резултатите, получени от моделирането на динамичните характеристики, са:

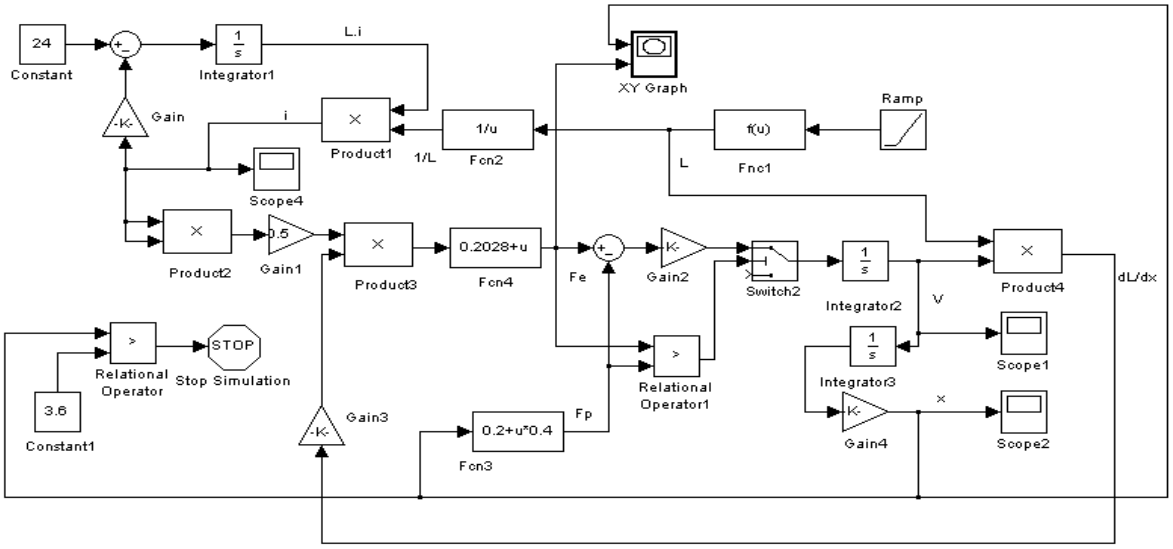
- Времето за включване на електромагнита получено от компютърния модел съвпада с измереното време с помощта на цифров осцилоскоп Tektronix 2211.
- Двете компоненти на времето на включване и опитно определени напълно съвпадат с получените стойности и от компютърното моделиране.

5.5. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕТО НА НАМОТКАТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТА ПРИ ДВИЖЕНИЕТО НА КОТВАТА ЧРЕЗ ЗАПИС НА ТОКА С КОНТРОЛЕР

От точното измерване на индуктивността на намотката до голяма степен зависят получените резултати за динамичните характеристики. Поради това в модела като входна величина се въвежда $\psi = Li$, като стойността ú се определя числено от тока на включване на електромагнита.

За точното определяне тока на включване се използва контролер, който е свързан с персонален компютър където се записват измерените стойности. На входа на контролера постъпва напрежение, пропорционално на протичащия ток през шунтов резистор.

На фиг. 5.11 е представена реализираната в SIMULINK структурна схема на системата от уравнения (5.1), (5.2а) и (5.3) като набор от блокове.



Фиг.5.11. Структурна схема реализирана в Simulink

Функции на отделните блокове са следните: блок Fcn1 – реализира функцията $L = f(t)$ представена чрез полином $L = at^3 + bt^2 + ct + d$; блок Fcn2 – реализира 1/L; блок Fcn3 – реализира $F_{np} = f(x)$; блок Gain задава съпротивлението на намотката; блок Gain2 задава масата на котвата на електромагнита; блок Constant задава напрежението, приложено върху намотката; блок Constant1 задава хода на котвата.

Изходните величини се набюдават и се отчитат от следните блокове: блок Scope1 дава скоростта на движение на котвата; блок Scope2 – дава преместването на котвата; блок XY Graph – дава електромагнитната сила; блок Scope3 – дава тока през намотката.

За да се установи влиянието на смущаващи въздействия върху динамичните характеристики на електромагнита е направен анализ на скоростта на движение на котвата и на електромагнитната сила. Извършения анализ включва изследване на динамичните характеристики при различни стойности на захранващото напрежение на бобината му. Изследвано е влиянието на поставените в магнитната му верига постоянни магнита върху неговите динамични характеристики. Получените резултати от тези изследвания са дадени в табл.5.3 и табл.5.4.

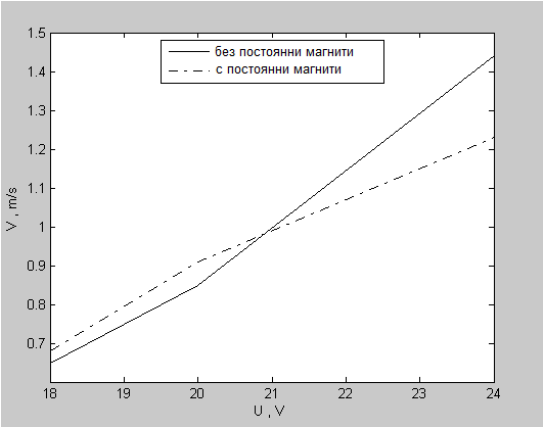
Таблица 5.3. Изследване с постоянни магнити

№	U, V	V, m/s	t, ms
1	18	0,68	52
2	20	0,90	40
3	22	1,05	34
4	24	1,23	28

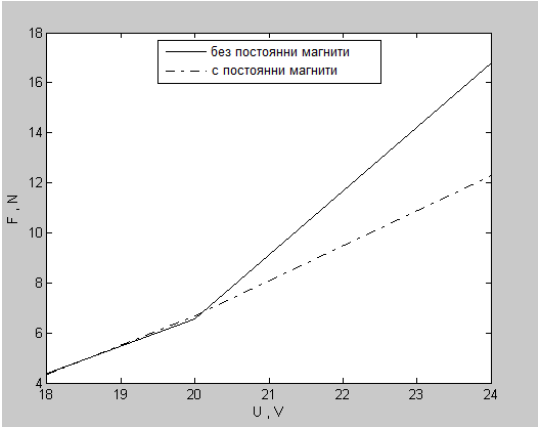
Таблица 5.4. Изследване без постоянни магнити

№	U, V	Vk, m/s	t, ms
1	18	0,65	55
2	20	0,82	44
3	22	1,10	32
4	24	1,45	26

На фиг.5.12 е представена зависимостта на скоростта на котвата в момента на затваряне на котвата при различни захранващи напрежения с и без постоянни магнити в магнитната верига на електромагнита.



Фиг.5.12. Скорост на котвата в момента на затварянето ú



Фиг. 5.13. Електромагнитна сила в момента на затваряне на котвата

На фиг.5.13 е дадена електромагнитната сила в момента на затваряне на котвата при различни захранващи напрежения с и без постоянни магнити в магнитната верига на електромагнита. Скоростта при движение на котвата, в зависимост от захранващото напрежение, в случая без постоянни магнити се изменя в по-широки граници в сравнение тези при наличие на постоянни магнити. В случая с постоянни магнити електромагнитната сила е по-малка, което се дължи на размагнитващото им действие и в контактната система на електрическия апарат ще има по-малки вибрации.

5.6. ИЗВОДИ ПО ПЕТА ГЛАВА

- Предлаганият метод използващ програмната среда SIMULINK позволява достатъчно точно и бързо определяне на динамичните механични и магнитни характеристики на електромагнит за постоянно напрежение при извесни динамични електрически характеристики.
- Извършеното сравнение между основните характеристики на електромагнита с и без постоянни магнити в магнитната му верига показва, че тяхното влияние е в посока на намаляване влиянието на захранващото напрежение върху работните характеристики.
- Правилното оразмеряване на електромагнита с отчитане на особеностите на ветрогенераторите и основно изискване за бързодействие води до намаляване на излишните заработвания на защитата.

ПРИНОСИ

По-съществените приноси в дисертацията са:

- Установени са параметрите, по които се съди за наличието на смущения в даден момент от време при функционирането на УРЗА. С параметрите за наличие на смущаващи въздействия се идентифицират събитията: повреда във вторичните измерителни вериги, к.с., надлъжни несиметрии; комутационни и атмосферни пренапрежения; смущения на честотата; хармоници в мрежата.
- Разработена е методика и софтуер, предназначени за електрически изчисления и симулиране на нормалните и аварийните режимите, с която се изчисляват настройките на УРЗА в разпределителните мрежи с отчитане на възникващите смущения. Методиката е адаптирана изследване на напречни несиметрични режими, надлъжни несиметрии, непълнофазни режими в разпределителни мрежи

за целите на УРЗА, с което се дава възможност да се следят режимните параметри и с тях да се съобразява реалната възможност от наличие на смущаващи въздействия.

- Установена е най-честата причина за смущения, предизвикващи излишни изключвания на УРЗА във вятърните и малките водни централи. Това са превишенията на напреженията над настроената стойност за заработване на защитата. Очакваният брой превишения на напрежението спрямо настрой-ката на напреженовата защита е от значение при търсене на компромис между възможността за «загрубяване» на защитата и последиците от това.
- Анализирани са защитите в разпределителни мрежи с малък ток на земно съединение и са установени случаите, при които те действат неправилно или изключват излишно.
- Обосновано е защо защита, действаща на началния знак на мощността с нулева последователност, не е подходяща за въздушни електропроводи, преминаващи през райони с интензивна мълниеносна дейност.
- Разработен е модел, използващ програмната среда SIMULINK, който позволява определяне на динамичните механични и магнитни характеристики на електромагнит за постоянно напрежение при извесни динамични електрически характеристики. Правилното оразмеряване на електромагнита с отчитане на особеностите на ДЕИ и основно изискване за бързодействие води до намаляване на излишните заработвания на защитата.

ПУБЛИКАЦИИ
по дисертацията

1. Райков К.Р. Изследване динамиката на процеса на включване на електромагнит с програмния продукт MATLAB. ISSN 0861-4717, Сп. “Електротехника и електроника” бр. 3-4, 2006, стр.47-50.
2. Райков К.Р., Д.И.Димитров. Компютърно адаптивен метод за изследване на динамичните характеристики на електромагнит. ISSN 1311-2864 Известия на Съюза на учените - Сливен, Том 11, 1, 2006, стр. 70-73.
3. Райков К.Р., Д.И.Димитров. Изследване чрез компютърен модел на динамичните характеристики на електромагнит при включване. ISSN 0477-0250, Университет по хранителни технологии - Пловдив, Научни трудове Том LIV, Свитък 3, Пловдив, 2007, стр. 196-201.
4. Неделчева С.И., К.В.Райков. Методика за оценка на смущенията при функционирането на устройствата за релейната защита и системната автоматика в разпределителни електрически мрежи. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №3, 2018, стр.3-9.
5. Неделчева С.И., К.В.Райков. Адаптиране на методиката за анализ на несиметричните режими от товара при наличието на смущения върху работата на устройствата за релейна защита. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №3, 2018, стр.10-15.
6. Неделчева С.И., К.В.Райков. Адаптиране на методиката за анализ на непълнофазните режими в разпределителни електрически мрежи за целите на релейната защита. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №3, 2018, стр.16-19.
7. Неделчев Н.А., К.В.Райков. Оценка на функционирането на устройства за земни защити в електрически мрежи с малък ток на земно съединение. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №3, 2018, стр.24-29.
8. Неделчев Н.А., К.В.Райков. Смущаващи въздействия при функционирането на устройствата за релейна защита и автоматика във вятърни централи. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №4, 2018, стр.22-25.
9. Неделчев Н.А., К.В.Райков. Смущаващи въздействия при функционирането на устройствата за релейна защита и автоматика на малки водни централи. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №4, 2018, стр.26-30.
10. Неделчев Н.А., С.И. Неделчева, К.В.Райков, С.Славов. Критерии за ефективност на функциониране на устройствата за релейна защита. ISSN 1312-3920, Сп. „Известия на ТУ-Сливен“, №4, 2018, стр.31-35.
11. Райков К.В. Анализ на изключванията на съоръжения, защитавани с цифрови релейни защити. ISSN 1312-3920. „Известия на ТУ-Сливен“, №4, 2018, стр.36-39.

DISTURBING IMPACTS IN THE OPERATION OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICES

ABSTRACT

In the dissertation the established parameters reveal the presence of disturbances at a given time in the operation of the relay protection and automation devices. The parameters for the presence of disturbing impacts identify the events: damage to secondary measurement circuits, short circuits, longitudinal asymmetries, switching and atmospheric overvoltages, frequency disturbances, harmonics on the network.

Methodology and software designed are developed for electrical calculations and simulation of the normal and emergency modes, which calculates the settings of the relay protection and automation devices in the distribution networks, taking into account the emerging disturbances. The methodology is an adapted study of transverse asymmetric modes, longitudinal non-symmetries, non-phase modes in distribution networks for the purposes of the relay protection and automation devices, which allows the monitoring of the parameters and to take into account the real possibility of disturbing effects.

The most common cause of disturbance causing unnecessary exclusions of relay protection and automation devices in wind and small hydropower plants has been identified. The problem consists in the excess voltages above the set-up protection value. The expected number of voltage overshoots relative to the voltage protection setting is important when we are looking for a compromise between the possibility of reducing the sensitivity of the protection and the consequences of this.

An analysis of the functioning of the protective devices in the distribution networks with low current on earth fault has been carried out. There are cases in which they act improperly or unnecessarily.

It is justified why a protection acting to the initial direction on power with zero sequence can not be used to protect a power lines located in areas with intense lightning.

A model was developed using Simulink software to determine the dynamic mechanical and magnetic characteristics of a constant voltage electromagnet with certain dynamic electrical characteristics. The proper dimensioning of the electromagnet, taking into account the characteristics of the decentralized energy sources and a basic requirement for rapid operation, leads to a reduction in the number of excesses of the protection.