



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ - СЛИВЕН
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, АВТОМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ”

Маг. инж. Христо Стефанов Илчев

ЗАЩИТА НА ИНТЕЛИГЕНТНИ
РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ

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”

Научен ръководител: проф. д-р инж. Стефка Неделчева

2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ към Инженерно-педагогически факултет - Сливен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.06.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 15.11.2021 г. от 13,00 часа в зала 1207 на Технически университет – София, ИПФ – Сливен на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-80 от 27.07.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д.м.н. Гани Трендафилов Стамов – член
2. доц. д-р инж. Мишо Иванов Мацанков – председател
3. проф. д.т.н инж. Чавдар Иванов Дамянов – член
4. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов – научен секретар
5. доц. д-р инж. Лилия Анестиева Станева – член

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов
2. доц. д-р инж. Мишо Иванов Мацанков

Резервни членове:

1. доц. д-р инж. Диляна Николаева Господинова
2. доц. д-р инж. Камен Димитров Сейменлийски

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

Дисертантът е докторант в свободна форма на обучение към катедра „Електротехника, автоматика и информационни технологии“ на факултет ИПФ – Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като преобладаващата част от резултатите са публикувани.

Автор: маг. инж. Христо Стефанов Илчев

Заглавие: „Защита на интелигентни разпределителни електрически мрежи“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в Издателство Авангард прима, гр. София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Съвременната тенденция в развитието на електроенергетиката е създаването на активно-адаптивни или интелигентни електрически мрежи (ИЕМ), наречени още Smart grid. Тяхното изграждане се улеснява, защото през последните години се внедриха, много достижения на силовата електроника, средства за комуникация и компютризация, технологии за управление на мрежите. Виждането за ИЕМ предполага обединение на технологично ниво на производителите на електроенергия, електрическите мрежи и потребителите в единна автоматизирана система.

Най-общото определение за ИЕМ е автономна електрическа мрежа или в по-широк смисъл електроенергийна система (ЕЕС), която съдържа комплекс от генериращи източници и консуматори на електрическа енергия, електропроводи, средства за преобразуване на електрическа енергия, комутационни апарати, устройства за защита и автоматика, акумулиращи устройства, информационно-технологични и управляващи уредби, способни автоматично да извеждат информация за текущото състояние и да организира адаптивна реакция след различни по вид (смушчаващи и/или управляващи) и интензивност („големи” или „малки”) въздействия, осигурявайки качествено электроснабдяване и устойчивост на ЕЕС като цяло.

Техническите средства са най-съществената част в практическата реализация на ИЕМ. Те могат да бъдат подразделени в следните основни групи:

- устройства за гъвкаво регулиране на режимите в променливотоковите преносните (FACTS) и в разпределителните електрически мрежи (DFACTS);
- устройства за ограничаване на токовете на късо съединение (КС);
- съвременни уредби за акумулация на електрическа енергия и свръхпроводящи токопроводи;
- преобразователи на напрежение и ток;
- цифровизация в електроенергетиката, изграждане на цифрови подстанции и внедряване на цифрови релейни защиты;
- информационни технологии и съвременни средства за автоматично управление;
- програмни средства (специализиран компютърен софтуер).

В етапа на проектиране на ИЕМ трябва да се осигури двустранно захранване на всички потребители, което се постига с избор на подходяща конфигурация.

В Smart grid се следят в реално време режимите на работа на всички участници в процеса на генериране, пренасяне и потребление на електроенергията. Получавайки обратна връзка посредством система от устройства в режим on-line, ИЕМ трябва автоматично да реагира на всички изменения в елементите на мрежата, като приема оптимални решения за предотвратяване на аварии и осъществяване на электроснабдяване с максимална надеждност и икономическа ефективност.

Внедряването на децентрализирани електроенергийни източници (ДЕИ) в ИЕМ за средно напрежение (СН) изменя режимните параметри - големините на пренасяните мощности по клоновете, напреженията във възлите, промяна на токовете на КС, големините на пренапреженията и др.

Изборът на защита с нелинейни ограничители на пренапрежения (НОП) зависи от начина на заземяване на звездния център (ЗЦ) на разпределителната електрическа мрежа, всеки от които има своите предимства и недостатъци. Особени проблеми възникват при избор на НОП за електрически вериги, защитени с вакуумни прекъсвачи.

Изборът на начина на заземяване на ЗЦ на разпределителна ИЕМ, на типа на НОП за защита от пренапрежения и отчитане на действието на вакуумните прекъсвачи са актуални проблеми, на чието решение е посветено настоящото изследване.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на изследването: защита от пренапрежения в разпределителни електрически мрежи за СН с ДЕИ.

Обект на изследването: разпределителни електрически мрежи за СН с ДЕИ.

Нерешени проблеми:

- Не е публикувана оценка на досегашния опит и съставена методика за избор на начин на заземяване на ЗЦ в разпределителните електрически мрежи за СН.
- Няма методика и софтуер за избор на НОП в разпределителни мрежи за СН и математичен модел за изчисляване на остатъчното напрежение.
- Няма разработена методика за избор на защита от пренапрежения в разпределителните електрически мрежи за СН след присъединяване на ДЕИ във вериги, защитавани с вакуумни прекъсвачи.

Задачи за изследване:

- Да се състави методика за избор на начин на заземяване на ЗЦ в разпределителните електрически мрежи за СН.
- Да се разработи методика и софтуер за избор на НОП в разпределителни мрежи за СН и математичен модел за изчисляване на остатъчното напрежение.
- Да се създаде методика за избор на защита от пренапрежения в разпределителните електрически мрежи за СН след присъединяване на ДЕИ във вериги, защитавани с вакуумни прекъсвачи.

Научна новост

- Обосновават се критериите за избор на оптималния тип заземяване на ЗЦ в електрически мрежи за СН: показателят за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване на ЗЦ.
- Разработва се методика за избор на оптимален вариант за заземяване на ЗЦ на разпределителни мрежи за СН за двата обосновани критерия с прилагане на математичната теория на игрите.
- Създадена е методика и софтуер за избор на НОП в разпределителните мрежи за СН с различен начин на заземяване на ЗЦ. Определени са независимите влияещи фактори върху големината на тока през НОП и е получен адекватен математичен модел за неговото изчисляване с помощта на теорията за планиране на експеримента.
- Съставена е методика и алгоритъм за избор на НОП за защита на електрическите уредби за СН, съоръжени с вакуумни прекъсвачи, с отчитане на техните особености при комутации.

Практическа приложимост

- Получените резултати са приложими и полезни в електрически мрежи за СН с различни видове заземявания на ЗЦ.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертацията са публикувани в 6 публикации, 2 от които самостоятелни. 5 от публикациите са в списания, а 1 е публикувана в "Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology".

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 115 страници, като включва въведение, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 124 литературни източници, като 50 са на латиница и 77 на кирилица. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа

1. АНАЛИЗ ЗА РЕЖИМИТЕ НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

1.1. РЕЖИМИ НА РАБОТА НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ

Режимите на работа на ЗЦ на трансформаторите в електроразпределителни мрежи за СН се обосновават и се регламентират в действащата нормативна уредба. Начинът на заземяване на ЗЦ оказва съществено влияние, върху токовете на з.с. и стойността на пренапреженията. При ефективно заземен ЗЦ за всяка точка и за всеки режим, напрежението на здравите фази спрямо земя не надвишава 0,8 от междуфазното напрежение U . При неефективно заземен ЗЦ напрежението на здравите фази спрямо земя е равно на междуфазното. При електрически мрежи с ефективно заземен ЗЦ токовете на еднофазно земно съединение (з.с.) са практически токове на късо съединение (КС), тъй като по стойност са близки до тока на трифазно КС. Поради тази причина се изискват мерки за бързо и надеждно изключване на съоръжението с КС, за ограничаване степента на повредата, както и мерки за осигуряване на безопасността. Последното е свързано с реализиране на ниски стойности на заземителните съпротивления (под $1\ \Omega$) в разпределителната мрежа за СН.

Предимствата на този режим са свързани с ниското ниво на комутационните пренапрежения и възможността да се използват 80% ограничители на пренапрежения - за защита от атмосферни пренапрежения.

1.1.1. Мрежи с изолиран звезден център

Съгласно изискванията на действащата нормативна уредба този режим на работа се използва при капацитивни токове на з.с., не по-големи от 10 А. Това са малки по дължина въздушни електропроводи (ВЕ) и мрежи на генераторно напрежение в електрическите централи. Основното предимство на този начин на заземяване на ЗЦ е в неговата простота на реализация и в създаване на условия за самоизгасване на електрическата дъга в мястото на преходно з.с. Това не налага изключване на повредения извод. Граничната стойност на тока на самоизгасване на дъгата е: за ВЕ - $15 \div 20\text{ А}$; за кабелните линии (КЛ) - около 5 А.

При мрежи с директно присъединени генератори или двигатели заземяване се изисква когато капацитивния ток при з.с. е по-голям от 5 А.

Недостатъците са свързани с големите стойности на пренапреженията върху здравите фази при прекъсваща дъга, които могат да надхвърлят три пъти стойността на номиналното им напрежение. При това съществува голяма вероятност от възникване двойни з.с., вследствие на пробиви в отслабена електрическа изолация на здравите фази. Земните съединения през прекъсваща дъга и двойните з.с. влошават условията за безопасност, в сравнение със случаите когато з.с. е метално или през малко преходно съпротивление.

1.1.2. Мрежи със звезден център, заземен през дъгогасителен реактор

С цел да се намалят токовете на з.с. и да бъдат създадени условия за самоизгасване на дъгата, в ЗЦ на системата се включва ДР. Този начин на заземяване на ЗЦ се използва предимно при ВЕ за СН с токове на з.с. над 10 А. Преимствата на способа при подържане на точна настройка, са в създаване на условия за изгасване на дъгата, при малък остатъчен ток в мястото на повредата. Вследствие бавното възстановяване на напрежението на засегнатата фаза, след изгасване на дъгата, се намалява

вероятността от прекъсваща дъга и пренапреженията на здравите фази са значително по-ниски, отколкото при мрежите с изолиран ЗЦ. Предимство на способа е, че не се прекъсва електрозахранването на потребителите, дори и при трайни з.с., които могат да се отстранят до няколко часа.

Граничните стойности на остатъчния ток в мястото на з.с., при които се предотвратява повторно запалване на дъгата, за ВЕ е $30 \div 40$ А (при разстройка до 20%). При КЛ, където з.с. са устойчиви, ефективността от използване на компенсация се свежда до ограничаване на токовете на з.с. и възможността за временно продължаване на електрозахранването. При този режим на работа се отстранява възможността за развитие на ферорезонансни пренапрежения. Недостатъците на режима се изразяват основно в трудностите по поддържане на компенсацията.

Изискванията на нормативната уредба са за поддържане на разстройка до 5%, при остатъчен ток в мястото на з.с. до 5 А. Това практически ограничава приложението на метода, при стойности на капацитивния ток близки или по-големи от 100 А, тъй като тогава ще трябва допустимата разстройка да е под 5%. Поддържането на разстройка до 5% в изцяло въздушна електропроводна мрежа, обикновено не е проблем и се постига със стъпално регулируеми ДР.

При смесени мрежи, с ВЕ и КЛ, се налага използването на плавно регулируеми ДР с дистанционно-ръчно или автоматично управление. Поддържането на допустимата разстройка, дори и при автоматично управление не винаги е възможно при планови комутации в електрическата мрежа или при изключвания за търсене на извод с повреда.

Недостатък на режима е и реалната възможност за резонансно повишаване на напрежението на звездния център в нормален режим на работа, вследствие несиметрия на мрежата или на напрежението на захранващия източник. При неточна настройка, се губят повечето от предимствата на режима - увеличава се степента на повреда в мястото на з.с. и се влошават условията по безопасност.

1.1.3. Мрежи със звезден център, заземен през малко индуктивно съпротивление

Този начин на заземяване на ЗЦ има ограничено приложение, предимно за намаляване на тока на еднофазно з.с. под тока на трифазно з.с. на генератори.

За използване на този начин в електроразпределителни мрежи, при запазване на ниски стойности на пренапреженията (с кратност до 2,5), се изисква тока на з.с. да е над 25 до 60% от тока на трифазно к.с. Така получените токове на з.с. са със стойности, значително по-големи отколкото при използване на нискоомно активно съпротивление, поради което този способ не е получил разпространение.

1.1.4. Изисквания при заземяване на звездния център през дъгогасителен реактор

Този режим на работа е ефективно да се използва във въздушни и смесени мрежи, когато кабелната част от мрежата не надвишава 10% от общата ѝ дължина и сумарния капацитивен ток на мрежата е до 100 А. Допуска се използването на този режим на работа и при сумарен капацитивен ток на мрежата над 100 А, както и при съотношение на кабелната част на мрежата към общата ѝ дължина над 10%, ако могат да се спазват изискванията на нормативната уредба - компенсацията да е под 5%, така че токът в мястото на з.с. да е под 5 А. Допуска се използването на ДР със стъпално регулиране при настройка с надкомпенсация, с реактивна съставляща на тока на з.с. до 10 А, при изцяло въздушна мрежа, когато най-дългият извод е с дължина по-малка от 5% от сумарната дължина на мрежата или конфигурацията на мрежата не се променя често. Когато в мрежата има линейни присъединения с дължина по-голяма от 5% от нейната

обща дължина, или конфигурацията на мрежата се променя периодично, наложително е използването на ДР с плавно регулиране. При всички режими на компенсация е необходимо да се спазват изискванията на нормите, регламентиращи допустимото напрежение на ЗЦ не-повече от 15% от фазното напрежение продължително и до 30% от фазното напрежение, в продължение на 1 час.

При заземяване на ЗЦ през ДР трябва да се имат предвид ограниченията, поставяни към сумарната мощност на инсталираните ДР спрямо мощността на силовия трансформатор, към чийто ЗЦ те са присъединени. За трансформатори със свързване звезда-звезда изискваното съотношение е $S_{\text{ДР}} \leq 0,1 S_{\text{ТР}}$; за трансформатори с група на свързване звезда-триъгълник-звезда - $S_{\text{ДР}} \leq 0,3 S_{\text{ТР}}$.

Необходимо е ДР и ЗЦ на силовия трансформатор да са защитени с подходящо подбран вентилен отвод или ограничител на пренапрежение. При използване на ограничител на пренапрежение, неговото номинално напрежение трябва да е с 20÷40 % по-високо от максималното фазно напрежение, в зависимост от характера на мрежата. По-високите стойности обикновено са свързани с по-голяма или изцяло въздушна мрежа. Ограничителят на пренапреженията трябва да е монтиран във веригата между ЗЦ на трансформатора и ДР.

1.1.5. Мрежи със звезден център, заземен през активно съпротивление

Условията за самоизгасване на дъгата в КЛ са по неблагоприятни, от колкото при ВЕ. Дъгите горящи, между жилото на някоя от фазите и металния екран на кабела, прерастват в междуфазни к.с. дори и при относителни малки токове: $5 \div 10$ А. Компенсирането на земните токове в кабелните мрежи с ДР не е целесъобразно, понеже при експлоатационни условия е трудно остатъчният ток да бъде поддържан под 5 А. Освен това при продължителни з.с. многократно се генерират пренапрежения, които могат да предизвикат пробив и на други места по мрежата. Тези така наречени многоместни пробиви са типични за експлоатацията на КЛ с отслабена изолация. Ето защо е желателно такива мрежи при з.с. да бъдат изключвани без забавяне.

Този начин на заземяване на ЗЦ се използва както при мрежи с малък, така и при мрежи с голям капацитивен ток на з.с.

Както у нас, така и в други страни, ЗЦ на кабелните мрежи се заземяват през малки активни съпротивления. На всички линейни присъединения се поставят релейни защиты за токове и напрежения на нулева последователност (така наречените земни защиты). Защитите действат на изключване, така че з.с. биват прекъсвани, преди още да са прераснали в КС.

Големината на земния ток е от значение с оглед на ограничаване на пренапреженията, гарантиране на сигурност и селективност в действието на релейната защита и намаляване на размера на повредите в съоръженията в мястото на з.с. От тези съображения е прието токът през активно съпротивление в КЛ на електрическите мрежи да бъде 300 А, а в мрежи с присъединени двигатели и генератори - 150 А.

Използват се два режима на заземяване на звездния център - през високоомно и през нискоомно активно съпротивление. Първият, съгласно посочените условия е приложим при мрежи с малък капацитивен ток - до 10 А. Тъй като обикновено не се изисква бързо изключване на извода с повреда, за подобряване на условията за самоизгасване на дъгата и за осигуряване на безопасността, се използва прекъсвач за автоматично заземяване на повредената фаза. Недостатък на този режим, освен ограничената му приложимост е и необходимостта от монтиране на шунтиращ бързодействащ прекъсвач, със собствено определяне на засегнатата фаза.

Заземяването през нискоомно активно съпротивление се използва предимно в мрежи с капацитивен ток над 10 А. Изисква монтиране на земни защиты на всяко

присъединение (всеки извод) за бързо и селективно изключване на повреденото присъединение. За целта е необходимо тока на з.с. да е достатъчно голям - използват се стойности от 50 до 1000 А. Предимствата на метода са ограничаване на пренапреженията и селективно изключване на присъединението с повреда.

Недостатъците са свързани с осигуряване на селективността на защитите при високи стойности на капацитивния ток и термичната устойчивост на активното съпротивление. Увеличените токове на з.с. в сравнение с разгледаните режими, макар и действащи кратковременно, влошават условията по безопасност. По тази причина, методът се прилага предимно при големи градски кабелни мрежи средно напрежение. Подобряване на условията по безопасност, при наличие на ВЕ може да се извърши с използване на автоматично заземяване на повредената фаза.

1.1.7. Мрежи с комбинирано заземен звезден център през дъгогасителен реактор и активно съпротивление

Комбинираното заземяване на ЗЦ се реализира с комбинация от ДР и нискоомно активно съпротивление. Използва се в смесени мрежи с капацитивен ток при з.с., достигащ до около 100 А.

Предимствата на този режим на работа на ЗЦ са свързани с възможността за ликвидиране на з.с. по въздушната част на електрическата мрежа за времето на действие на ДР ($1 \div 3$ s) и за селективно изключване на трайните з.с. при включването на активното съпротивление. Недостатъците на способа са съвкупност от недостатъците на двата режима (заземяване през ДР и през активно съпротивление).

Съществен недостатък е и значителното усложняване и оскъпяване на схемата (ДР с плавно регулиране, автоматика за поддържане на настройката, активно съпротивление с прекъсвач за комутирането му, земни защити на всички присъединения и т.н.). По тази причина се счита, че този начин следва да се прилага само при технически и икономически обосновани случаи.

Препоръчва се използването на комбинирано заземяване на ЗЦ в смесени мрежи, когато кабелната част на мрежата е по-малка от 40% от общата дължина на мрежата.

1.2. РЕЖИМНИ ПАРАМЕТРИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНИ НАЧИНИ НА ЗАЗЕМЯВАНЕ НА ЗВЕЗДНИТЕ ЦЕНТРОВЕ

В преходния процес на з.с. в електрическа мрежа с изолиран ЗЦ напреженията на здравите фази могат да достигнат до 2,5 от фазното напрежение U_ϕ , а при з.с. през прекъсваща се дъга - до $3,2 U_\phi$. Токът на з.с. зависи само от капацитета спрямо земя на трифазната система и стойността му е много по-малка от работния ток.

В електрическа мрежа със ЗЦ, заземен през активно съпротивление, токът в мястото на з.с. $\dot{I}_{zc} = \sqrt{\dot{I}_R^2 + \dot{I}_C^2}$ е с активна съставка $\dot{I}_R = \dot{U}_\phi / R$ и с капацитивна $\dot{I}_C = 3\omega C \dot{U}_R$. Напреженията на здравите фази при з.с. достига до 2,4 от фазното напрежение U_ϕ при $I_R > I_C$. Тяхното въздействие е краткотрайно до изключване на повредения участък от релейната защита.

1.3. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ЗАЩИТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ВАКУУМНИ ПРЕКЪСВАЧИ

През последните 30 години при създаването на комутационни съоръжения за СН се разви нова насока, която да замени маслените с вакуумни прекъсвачи.

Най-важните предимства на вакуумните прекъсвачи са:

- бързо възстановяване на средата след изключване;
- бързодействие;
- малки размери и възможност за ориентация в пространството при произволно положение;
- пожарна безопасност и др.

Основният недостатък на вакуумните прекъсвачи е способността им да генерират повишено пренапрежение по време на превключване на индуктивно-капацитивни елементи (трансформатори, двигатели). Това се дължи на срязването на токовете, които трябва да бъдат изключени и повторното запалване на дъгата, когато контактите се разминават.

Многократните повторни запалвания създават поредица от стръмни импулси на пренапрежения на клемите на товара, които оказват влияние върху изолацията на двигателите и трансформаторите. Пренапреженията при прекъсвания на тока имат по-плоска предна част и засягат основната изолация. Бързината на действие и много бързо възстановяване при изключване на индуктивен ток на товара (рязко прекъсване на тока) води до появата на значителен недостатък на вакуумните прекъсвачи, като генериране на повишено ниво на пренапрежение, опасно за изолацията на комутираното съоръжение (до $8 \div 9 U_{\phi}$).

Проведеният литературен обзор позволява да се конкретизира целта на изследването, да се определят нерешените проблеми и да се формулират задачите за решаване в дисертацията.

Г л а в а в т о р а

2. МЕТОДИКА ЗА ИЗБОР НА ВИДА НА ЗАЗЕМЯВАНЕТО НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

През последните години бяха въведени в експлоатация много ДЕИ, присъединени към разпределителните мрежи за СН. С тяхното изграждане се променят режимните параметри в присъединителните клонове. Предстои реструктурирането и изграждането на интелигентни електрически мрежи Smart grid.

За да се избере оптималният режим за заземяване на ЗЦ в реални експлоатационни условия, е необходимо да се оценят влияещите фактори върху режимните параметри в променените условия и да се изберат критерии за оптималност.

Целта във втора глава е да се разработи методика за избор на оптимален режим на заземяване на ЗЦ в разпределителна мрежа за СН с присъединени ДЕИ по обосновани критерии.

2.1. КРИТЕРИИ ЗА ИЗБОР НА ВИДА НА ЗАЗЕМЯВАНЕТО НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

2.1.1. Ефективност на заземяване на звездните центрове

Показателят за ефективност (E_{ef}) на режима на заземяване на ЗЦ характеризира надеждността на функциониране на електрическата мрежа за СН при еднофазни земни съединения (ЕЗС) и се оценява с уравнението:

$$E_{ef} = 1 - N_{D3C} + \frac{N_{MKC}}{N_{E3C}} = \frac{N_{D3C} + N_{MKC}}{N_{D3C} + N_{MKC} + N_{K3C} + N_{Y3C}}, \quad (2.1)$$

където $N_{ЕЗС}$ е общият брой ЕЗС; $N_{ДЗС}$ - броят на ЕЗС, преминаващи в двойни з.с. (ДЗС); $N_{МКС}$ - броят на ЕЗС, преминаващи в междуфазни къси съединения (МКС); $N_{КЗС}$ - броят на краткотрайните преходни ЕЗС; $N_{УЗС}$ - броят на устойчивите ЕЗС.

При големи стойности на $N_{ЕЗС}$ отношението $(N_{ДЗС} + N_{МКС})/N_{ЕЗС}$ характеризира вероятността за преход на ЕЗС в МКС, което се съпровожда с автоматично изключване на повредения елемент. Показателят за ефективност $E_{ef} < 0,7$ за електрически мрежи за СН с изолиран ЗЦ. Посочената стойност е значително по-ниска за КЛ за СН с изолиран ЗЦ при капацитивен ток $I_{C\Sigma} \geq 5 \div 10 \text{ A}$, при наличие на електродвигатели, защото техните изолационни запаси са по-ниски в сравнение с другите елементи в схемата и др. Изолираният ЗЦ е най-слабо ефективния режим. Приемливи стойности на показателя за ефективност се постигат при мрежи за СН, изградени с ВЕ.

Заземяването на ЗЦ през ДР е ефективно средство за предотвратяване на негативните последици при ЕЗС без незабавно изключване на повредения елемент. Стойностите на показателя за ефективност E_{ef} в някои случаи достигат до $0,8 \div 0,9$. В редица мрежи показателят за ефективност E_{ef} при заземяване на ЗЦ през ДР има стойности, съпоставими или по-ниски, отколкото в режим на изолиран ЗЦ. Основните причини са следните:

- липса в компенсирания мрежи на устройства за автоматична настройка на компенсацията или несъвършенна настройка, поради което нейната стойност на практика се отличава от резонансната;
- недостатъчно техническо съвършенство на ДР;
- несиметрия на фазните проводимости към земя на мрежата с ВЕ;
- големи стойности на остатъчния ток в мястото на ЕЗС при голям капацитивен ток поради влиянието на некомпенсируемите от ДР активна съставка и висши хармоници;
- недостатъчно прецизна работа на устройствата за защита и селективна сигнализация на ЕЗС, които могат да доведат до нарастване на остатъчния ток в мястото на повредата или до увеличаване на времето за търсене на повредения елемент.

Стойностите на показателя за ефективност E_{ef} в мрежи за СН със ЗЦ, заземен през резистор са съпоставими с тези при заземяване на ЗЦ пред ДР. Високоомното заземяване на ЗЦ е препоръчително в електрически мрежи $6 \div 10 \text{ kV}$ при капацитивен ток $I_{C\Sigma} = 5 \div 10 \text{ A}$. Такива са част от мрежите с ВЕ $6 \div 10 \text{ kV}$, късите КЛ и др.

Нискоомното заземяване на ЗЦ е целесъобразно само в електрическите мрежи, където е допустимо изключване на всеки елемент по условията за електрическо и технологично резервиране, а също е възможно въвеждане на средства за автоматизация в разпределителната мрежа и пр.

2.1.2. Ограничения при избор на заземяване на ЗЦ в електрически мрежи за СН

Пренапреженията в мрежите за СН са опасни не само с амплитудата, но и с продължителността си. Те обхващат цялата мрежа, което повишава вероятността от пробив на изолацията, което може да стане не само в мястото на ЕЗС, но и в отдалечени точки. Както устойчиви, така и прекъсващи дъги могат да горят дълго и да се прехвърлят на другите фази, което ще доведе до междуфазно КС. Затова във всички случаи е необходимо бързо премахване на прекъсващата дъга, което може да бъде постигнато чрез ограничаване на тока през дъговата междина, намаляване на скоростта на възстановяване на напрежението и ликвидирание на прекъсващия характер на дъгата.

Големината на капацитивния ток се определя с $I_3 \approx 3\omega C_\phi U_\phi$, където C_ϕ е частичният

фазов капацитет; U_ϕ - фазното напрежение; ω - кръговата честота. Влиянието на големината на капацитивния ток е следното:

- При твърде малки токове I_3 дъгата гасне практически без повторни запалвания и съпровождащите ги пренапрежения или с техния малък брой.
- С увеличаване на тока I_3 се наблюдава нееднократно повторно запалване на дъгата и пренапрежения, дъгата се разтяга поради електродинамичните усилия и топлинните изменения и накрая загасва. Тогава възниква вероятност за прехвърляне на разтегната дъга на съседните фази и възникване на двуфазни и трифазни КС.
- Ако токът I_3 се доближава или превишава критичната стойност ($I_{3\text{кр}}$) вероятността за загасване на дъгата съществено намалява и вероятността за прехвърляне на дъгата към съседните фази нараства. Големината на критичния ток $I_{3\text{кр}}$ е толкова по-малка, колкото по-голямо е работното напрежение на мрежата.

Максималните работни напрежения, съответстващи на номиналните напрежения (U_n), критичният ток на ЕЗС за допустимите дължини на ВЕ и КЛ и стойностите на I_{C0} в зависимост от сечението s са дадени в таблици 2.1÷2.4.

Допустимата дължина на мрежа с ВЕ е 200 km при $U_n = 10\text{ kV}$ и 240 km при $U_n = 20\text{ kV}$, а стойностите за КЛ са представени в таблица 2.2.

Таблица 2.1. Максимално работно напрежение

Номинално напрежение, kV	6	10	20
Максимално работно напрежение, kV	6,9	11,5	23

Таблица 2.2. Критичен ток на ЕЗС

Номинално напрежение, kV	6		10		20
Наличие на електрическа машина	да	не	да	не	не
Критичен ток на ЕЗС, А	5	30	5	20	15
Допустима дължина на КЛ, km	5	20	4	16	4

Таблица 2.3. Частичен капацитет за фаза и ток на ЕЗС

Номинално напрежение, kV	6		10		20	
Вид на електропровода	ВЕ	КЛ	ВЕ	КЛ	ВЕ	КЛ
Частичен капацитет за фаза, C_ϕ , nF/m	4	250	4	170	5	270
Ток на ЕЗС, I_3 , А	1,5	90	2,5	110	6,3	340

Таблица 2.4. Големината на капацитивния ток I_{C0} в зависимост от сечението s на проводниците

Сечение s , mm ²	35	50	70	120	185	240
Капацитивен ток I_{C0} , А	0,52	0,59	0,71	0,82	1,2	1,3

Ако $I_3 > I_{3\text{кр}}$ и $l > l_{\text{доп}}$, използването на изолиран ЗЦ е нецелесъобразно и е необходимо да се премине към схема с компенсация на тока на ЗС. Това са две от ограниченията, които трябва да се спазват при избор на заземяване на ЗЦ в електрически мрежи за СН.

2.1.3. Пренапрежения в електрическа мрежа за СН

• Мрежа с изолиран ЗЦ

Най-голямата кратност на пренапрежението в мрежа с изолиран ЗЦ е 3,2. Пренапреженията намаляват с увеличаване на активната съставка на тока на ЕЗС.

В граничния случай те намаляват до големината на 2,4 от фазното е.д.н. (E_ϕ) при $I_a/I_c \approx 1$. По-нататъшното увеличаване на активната съставка на тока на ЗС почти не оказва влияние на големината на пренапреженията.

Резултатите от изчисленията на максималните кратности на пренапреженията $U_{B,C}/E_{\phi}$ за мрежа за СН са представени в таблица 2.5.

Таблица 2.5. Максимални кратности на пренапреженията $U_{B,C}/E_{\phi}$

I_a/I_c	0,2		0,4	1	6	
C_{mf}/C_{ϕ}	0	1/3	1/3	1/3	0	1/3
$U_{B,C}/E_{\phi}$	3,18	2,90	2,76	2,58	2,60	2,41

- **Мрежа със ЗЦ, заземен през резистор**

Наличието на активното съпротивление в ЗЦ на електрическите мрежи за СН води до намаляване на пренапреженията при дъгови ЕЗС в сравнение с големината, характерна за мрежите с изолиран ЗЦ. При заземяване на ЗЦ през активно съпротивление показателите за ограничаване на пренапреженията са по-добри в сравнение с компенсирана мрежа (с разстойката от 20 %).

При ЕЗС през преходно съпротивление с големина до 100 Ω пренапрежението при първия пик не превишава 2,4 E_{ϕ} , а при следващите запалвания на дъгата и установен режим на ЕЗС - не превишава 1,8 E_{ϕ} . Граничното намаляване на пренапреженията настъпва при $I_a/I_c=1$. По-нататъшното увеличаване на активната съставка на тока практически не оказва влияние на пренапреженията.

Наличието на активна съставка в тока на ЗС влияе на поведението на дъгата. При $I_a/I_c \geq 4$, независимо от големината на капацитивния ток, дъгата губи своя прекъсващ характер и става устойчива.

- **Пренапрежения в компенсирани мрежи.**

Подържането на настройката на ДР близка до резонансната, води не само до подобряване на условията за гасенето на дъгата, но и при равни условия, към съществено намаляване на пренапреженията при повтарящи се запалвания и угасвания на прекъсващата се дъга.

Съвпадането на момента за достигането до максимум на напрежението на повредената фаза и момента, когато $e_{AB} = \sqrt{3} E_{\phi m}$, е малко вероятно, поради което реалните пренапрежения ще бъдат по-малки.

Обобщаване на данни от статистически анализ на пренапреженията в разпределителни мрежи за СН показва, че техните стойности варират в широки граници.

2.1.4. Пропускателната способност на защитните устройства

По принцип едно от условията за избор на защитните устройства е пропускателната способност (енергоемкостта). Условието трябва да се проверява за мрежи с различен тип заземяване на ЗЦ. При защита с НОП в мрежи с изолиран ЗЦ или заземен през ДР, е възможно възникването на дъгови з.с. Тогава най-голямото въздействие на НОП съответства на работата на НОП при дъгови пренапрежения от ЕДЗС. За изчисляване на енергоемкостта се приема 10% недокомпенсация на капацитивния ток на ЕЗС.

Относителната енергоемкост ($W_{отн}$) на НОП за проверка на условието за пропускателна способност е

$$W_{отн} \geq \frac{W}{U_{н доп}} = \frac{(L_n I_{cp}^2)/2}{U_{н доп}} \quad (2.2)$$

където I_{cp} е токът на срязване на НОП (за вериги, съоръжени с вакуумни прекъсвачи $I_{cp}=27$ A); $U_{н доп}$ – продължителното допустимо работно напрежение ($U_{н доп}=7,2$ kV при $U_n=6$ kV; $U_{н доп}=7,2$ kV при $U_n=6$ kV); L_n – индуктивното съпротивление:

- за двигатели: $L_H = \frac{X_d}{\omega} = \frac{U_n^2 / S_{нд}}{\omega}$, където X_d е индуктивното съпротивление на двигателя; $S_{нд}$ – номиналната мощност на двигателя; U_n – номиналното напрежение; ω – кръговата честота;
- за трансформатори: $L_H = \frac{U_n^2}{\omega i_0 S_{нт}}$, където $S_{нт}$ е номиналната мощност на трансформатора; U_n – номиналното напрежение; ω – кръговата честота; i_0 – токът на празен ход, %.

2.1.5. Необходимост от допълнителни средства за реализация на вида на заземяването на ЗЦ

За мрежите с изолиран ЗЦ за СН не се изисква допълнителна апаратура и разходи за заземяване. Технически лесно се решават въпросите, свързани със защита и селективна сигнализация на ЕЗС.

Заземяването на ЗЦ през ДР изисква допълнителни разходи за заземителни съоръжения и устройства за автоматично управление на настройката на компенсацията. В сравнение с мрежите с изолиран ЗЦ, при заземяването през ДР съществуват трудности при решаване на въпросите за защита и селективна сигнализация на ЕЗС.

Заземяването на ЗЦ през резистор също изисква допълнителни разходи, но сравнително просто се решават проблемите за защита и сигнализация на устойчивите ЕЗС.

Обобщение:

- Показателят за ефективност на режима на заземяване на ЗЦ характеризира надеждността на функциониране на електрическата мрежа за СН при ЕЗС.
- Големината на пренапреженията е основният критерий за избор на защита от тях. Енергоемкостта зависи от типа на избраното защитно средство.
- Големината на капацитивния ток и дължината на електропроводите, са параметри, които зависят от номиналното напрежение на конкретната мрежа. Това са ограниченията, които трябва да се спазват при избор на заземяване на ЗЦ в електрически мрежи за СН. Ако $I_3 > I_{3кр}$ и $l > l_{доп}$, използването на изолиран ЗЦ е нецелесъобразно и е необходимо да се премине към схема с компенсиран ЗЦ или ЗЦ, заземен през резистор.
- Максималните големина на пренапреженията и енергоемкостта са две от основните условия за избор на защитни средства в разпределителните мрежи за СН.
- Критериите за избор на оптимален тип заземяване на ЗЦ са: показател за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване на ЗЦ.

2.2. ИЗБОР НА ВИДА НА ЗАЗЕМЯВАНЕ НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В МРЕЖА ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ

Необходимо е да се предложи подход за избор на оптималния режим на заземяване на ЗЦ в разпределителни мрежи за СН с прилагането на подходящ математичен апарат.

Избор на вариант за заземяване на звездния център чрез прилагане на математичната теория на игрите

Изборът на оптимален вариант зависи от използваните данни и прилагания изчислителен метод. Съгласно математичната теория на игрите, вземането на оптимално решение се извършва:

- в условията на определеност при точно зададени параметри;

- при риск, когато данните се описват чрез вероятностни разпределения;
- в условията на неопределенност, когато на данните се задават теглови коефициенти, които отчитат тяхната значимост в оптимизационния процес.

Като критерии за избор на оптимален тип заземяване на ЗЦ се избират критериите: показателят за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване на ЗЦ. При решаване на задачата не всички данни са точно определени. Трудността възниква при оценка на степента на значимост на критериите чрез метода за йерархичен анализ. В тези случаи е подходящ за прилагане метода за йерархичен анализ от математичната теория на игрите.

За реални изследвания за разпределителна мрежа за СН трябва да се разгледат режимите при различните начини на заземяване на ЗЦ. За целта са разработени три варианта за избор на заземяване на ЗЦ в мрежи за СН с ДЕИ: Вариант А - изолиран ЗЦ; Вариант В - заземен ЗЦ през активно съпротивление; Вариант С - заземен ЗЦ през ДР.

За да се избере оптималният режим на ЗЦ се формулират два основни критерия:

- показател за ефективност на режима на заземяване на ЗЦ;
- допълнителните разходи за изграждане на вариантите за заземяване на ЗЦ.

Предварителният анализ на критериите и проведената експертна оценка показва, че показателят за ефективност на режима на заземяване на ЗЦ е следният:

за вариант А - 0,7; за вариант В - 0,84; за вариант С - 0,91.

Ако се приеме за основен вариант А и към него се приведат получените стойности за варианти В и С, се получава в относителни единици (о.е.) съответно:

вариант А - 1; вариант В - 1,2; вариант С - 1,3 (таблица 2.8).

Допълнителните средства за заземяване на ЗЦ също са представени в о.е. за трите варианта, съответно: вариант А - 1; вариант В - 1,2; вариант С - 1,4.

Таблица 2.8. Оценка на вариантите по критериите в о.е. и теглови коефициенти за избор на заземяване на ЗЦ

Критерии	Оценка			Теглови коефициент
	Вариант А	Вариант В	Вариант С	
Критерий 1 - Показател за ефективност на режима на ЗЦ	1	1,2	1,4	5
Критерий 2 - Допълнителни средства за заземяване на ЗЦ	1	1,2	1,3	1

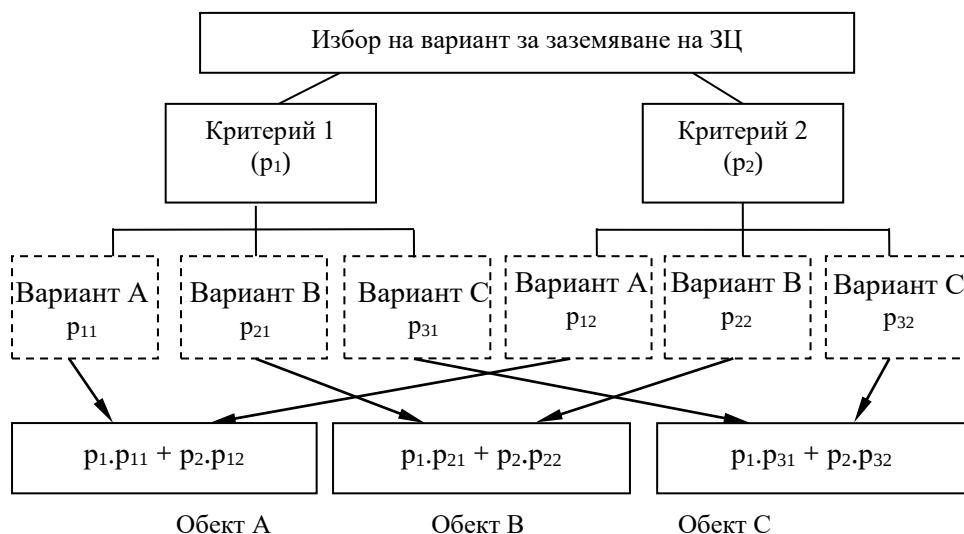
Показателят за ефективност на режима е по-значим от допълнителните разходи за изграждане на вариантите за заземяване на ЗЦ. Ефективността на режима е показател, свързан с експлоатационните разходи за целия период на експлоатация на електрическата мрежа, а допълнителните разходи са еднократно влагани инвестиции за изграждане на съоръженията. Съответните коефициенти на тежест за критерий 1 и 2 са съответно 5 и 1 (таблица 2.8).

Анализът за оценка на трите варианта се провежда от гледна точка на двата критерия (таблица 2.9). За критерия показател за ефективност на режима се приема теглови коефициент p_1 %, а за критерия допълнителни разходи – p_2 %.

Структурата на задачата за вземане на оптималното решение е дадена на фиг.2.1.

Таблица 2.9. Варианти и критерии за избор на заземяване на ЗЦ

Критерии	Варианти		
	А	В	С
Критерий 1 - p_1	p_{11}	p_{21}	p_{31}
Критерий 2 - p_2	p_{12}	p_{22}	p_{32}



Фиг.2.1. Структура за вземане на оптималното решение

Определя се матрицата на сравненията А, като за критерия показател за ефективност на режима се приема теглови коефициент 5, а за критерия допълнителни разходи – 1. Величините за съответните тегла за вариантите А, В и С от гледна точка на критерии 1 и 2 се дават в таблица 2.10.

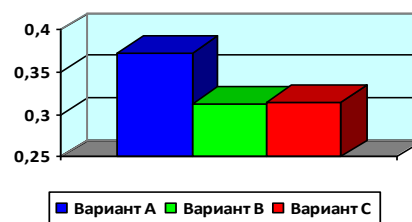
Таблица 2.10. Относителни теглови коефициенти за критериите

Критерии	Варианти		
	А	В	С
Критерий 1	28,5%	33,1%	38,4%
Критерий 2	39,1%	30,9%	30,0%

Определяне на комбинираните теглови коефициенти за вариантите

Оценката на трите варианта е основана на изчисляване на *комбинираните* теглови коефициенти за всеки от тях.

- Вариант А: $0,17 \cdot 0,285 + 0,83 \cdot 0,391 = 0,373$;
- Вариант В: $0,17 \cdot 0,331 + 0,83 \cdot 0,309 = 0,312$;
- Вариант С: $0,17 \cdot 0,384 + 0,83 \cdot 0,3 = 0,314$.



Фиг.2.3. Съпоставката на резултатите от изчисленията за трите варианта

На базата на тези изчисления вариант А получава най-високо комбинирано тегло и е оптималният избор. Оптималният вариант по двата избрани критерия е изолираният ЗЦ за разпределителни мрежи за СН.

Разработеният алгоритъм позволява да се въвежда различен коефициент на тежест на двата критерия, в съответствие с конкретно разглежданата електрическа мрежа. Резултатите от изчисленията дават оптималния вариант на заземяване на ЗЦ на електрическата мрежа за СН в според избраните критерии

Обобщение:

- Методът за йерархичен анализ от математичната теория на игрите е подходящ за прилагане при вземане на решения, когато не всички показатели могат точно да се определят количествено, но подлежат на експертна оценка по цифрова скала.
- Правилното подбиране на критериите и степента на тяхната значимост трябва да се извърши след предварителен анализ и експертна оценка или чрез ранжиране на влияещите фактори.
- Разработеният алгоритъм за избор на оптимален вариант на заземяване на ЗЦ позволява да се задава различна степен на значимост на формулираните основни критерии за вземане на решението.
- Прилагането на метода за йерархичен анализ от теорията на игрите позволява да се определи оптималния вариант на заземяване на ЗЦ на електрическата мрежа за СН в според избраните критерии.

2.3. СЪСТАВЯНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ИЗБОР НА ВАРИАНТ ЗА ЗАЗЕМЯВАНЕ НА ЗВЕЗДНИЯ ЦЕНТЪР В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Критериите за избор на оптимален вариант на заземяване на ЗЦ в разпределителни мрежи за СН са съответно показателят за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване (т.2.1).

В електрическите мрежи за СН се използват три варианта на заземяване на ЗЦ: изолиран, заземен през активно съпротивление и заземен през ДР. Математично обосноваият подход в т.2.2 с прилагане на йерархичния метод от теория на игрите позволява да се избере оптималният вариант по двата избрани критерия.

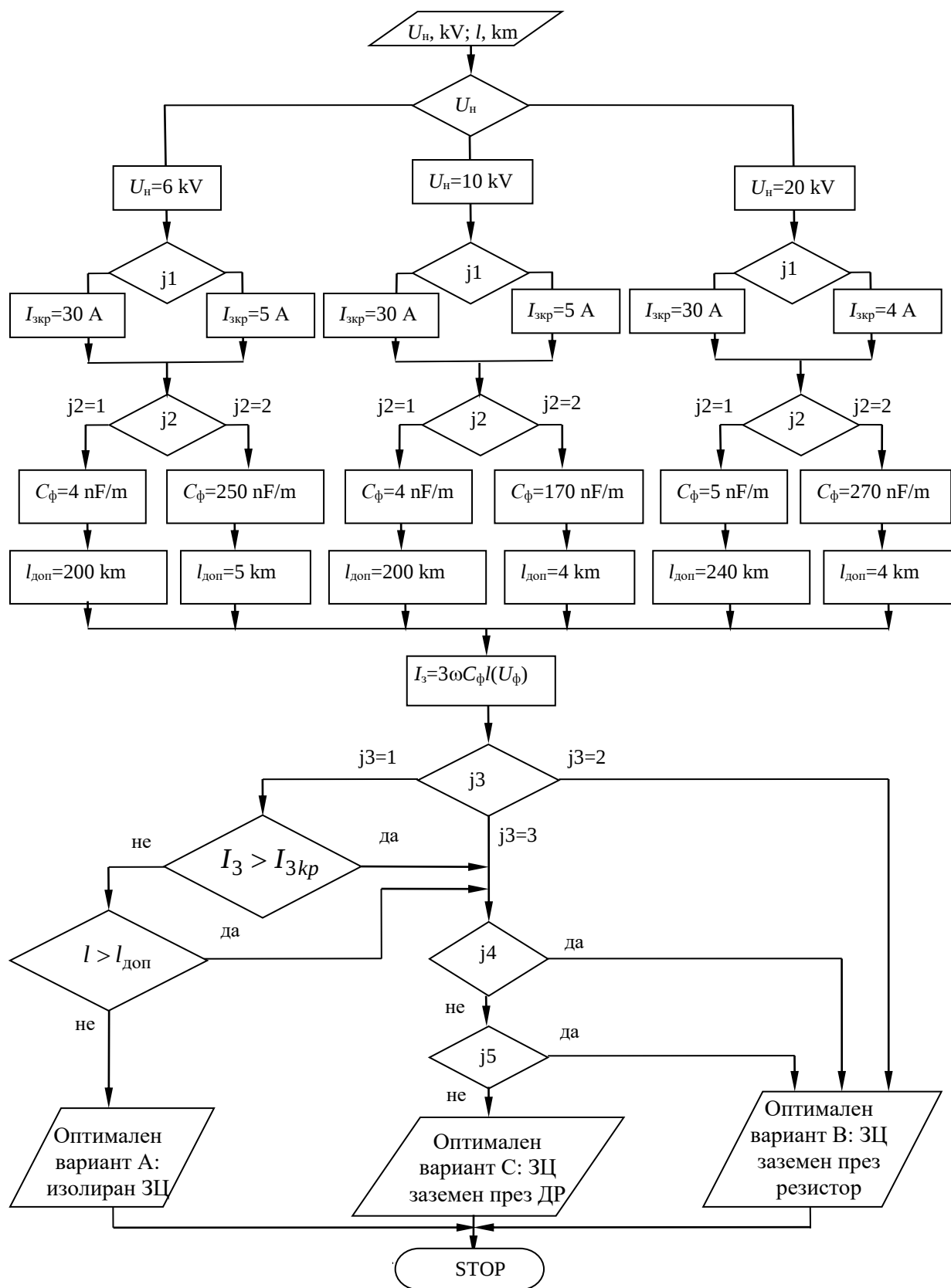
Целта е да се състави методика и изчислителен алгоритъм за избор на вариант за заземяване на ЗЦ в разпределителни мрежи, на базата на избраните критерии и възможните варианти.

Структура на методиката

На базата на резултатите от проведеното изследване за избор на критериите в т.2.1 и подхода в т.2.2 с прилагане на математичната теория на игрите може да се състави методика за избор на вариант за заземяване на ЗЦ в разпределителни мрежи. Методиката се състои от 4 стъпки :

- стъпка 1 – обосновка на критериите за оптимален избор за конкретна електрическа мрежа за СН, в съответствие с т.2.1;
- стъпка 2 – прилагане на метода на йерархичния анализ от теория на игрите за определяне на оптималния тип заземяване на ЗЦ по избраните критерии и по математичния апарат, описан в т.2.2;
- стъпка 3 – ако оптималният вариант е изолиран ЗЦ се прави проверка на ограничителните условия, мотивирани в т.2.1;
- стъпка 4 – вземане на решение за заземяване на ЗЦ с отчитане на ограничителните условия.

Проверката на ограничителните условия от т.2.1 се извършва след въвеждане на входни данни за номиналното напрежение (U_n) в алгоритъма, показан на фиг.2.5.



Фиг.2.5. Избор на оптимален вариант за заземяване на ЗЦ в мрежи за СН без и с ДЕИ с отчитане на ограниченията

На фиг.2.5 са приети следните означения: $j1$ – индекс за наличие на ДЕИ: $j1=1$ – без ДЕИ; $j1=2$ – с ДЕИ; $j2$ – индекс за вида на електропровода: $j2=1$ – ВЕ; $j2=2$ – КЛ и смесени ВЕ и КЛ; $j3$ – индекс за избрания оптимален вариант с прилагане на математичната теория на игрите ($j3=1$ – вариант А; $j3=2$ – вариант В; $j3=3$ – вариант С); $j4$ – индекс за възможност за възникване на ферорезонансни пренапрежения; $j5$ – индекс за възможност за възникване на ЕЗС през прекъсваща дъга. Според въведеният индекс за $j1$ се задават алгоритмично данните да критичният ток на ЕЗС ($I_{з\text{кр}}$). Според стойността на индекса за вида на електропровода $j2$ (ВЕ или КЛ) се задават стойностите на частичен капацитет за фаза (C_ϕ) и допустимата дължина на електропровода ($l_{\text{доп}}$). С въведените входни данни се изчислява токът на ЕЗС (I_z). С индекса $j3$ се въвежда вида на избрания оптимален вариант с прилагане на математичната теория на игрите ($j3=1$ – вариант А – изолиран ЗЦ; $j3=2$ – вариант В – ЗЦ, заземен през ДР; $j3=3$ – вариант С – ЗЦ, заземен през резистор). Ако е избран вариант А (изолиран ЗЦ) се проверяват двете ограничителни условия $I_{\text{кр}} > I_{з\text{кр}}$ и $l > l_{\text{доп}}$. Ако те са удовлетворени, се избира за оптимален вариант А. Ако условията не са удовлетворени, с индекс $j4$ се проверява възможността за възникване на ферорезонансни пренапрежения, а с индекс $j5$ – възможността за възникване на ЕЗС през прекъсваща дъга. Ако няма такива възможности за реалната електрическа мрежа се избира заземяване на ЗЦ през ДР. Ако има възможности за възникване на ферорезонансни пренапрежения или за ЕЗС през прекъсваща се дъга, се преминава към заземяване на ЗЦ през резистор.

Ограничението по електробезопасност има съществено значение при избора на заземяване на ЗЦ през резистор в разпределителни въздушни мрежи за СН. Едно от условията за избора на големината на резистора е електробезопасността. У нас в мрежите за собствени нужди във всички топлофикационни централи е въведено активно съпротивление в ЗЦ с големина $R_N = 60 \Omega$ за ток 60 А, а в системообразуващите подстанции – 40 Ω за ток 300 А. Условието за електробезопасност е значимо при избора на големината на резистора в рудничните мрежи за СН.

SN C:\Simulateur\TVN\Cal44		
Изчислителен режим:	нормален ▼	Заземяване на ЗЦ : Вариант 1
Номинално напрежение, kV	20 ▼	Изолиран ЗЦ ▼
Максимално напрежение, kV	23 ▼	Заземяване на ЗЦ : Вариант 2
Наличие на ДЕИ	не ▼	Заземен през ДР ▼
Вид на електропровода	ВЛ ▼	Заземяване на ЗЦ : Вариант 3
Сумарна дължина, km	48 ▼	Заземен през резистор ▼
• Резултати		
Критичен ток на ЕЗС, А	15	Критерий 1 – ефективност на режима на ЗЦ
Частичен капацитет за фаза, nF/m	5	Критерий 2 – допълнителни разходи
Ток на ЕЗС, I_z , А	2,6	Теглови коефициент :
• Проверка $I_z > I_{з\text{кр}}$	да	Критерий 1/Критерий 2 5/1 ▼
• Проверка $l > l_{\text{доп}}$	да	Относителни теглови коефициенти:
		за критерий 1: А/В/С 0,285/0,331/0,384 ▼
		за критерий 2: А/В/С 0,391/0,309/0,300 ▼
Избран вариант:		Вариант 1 - Изолиран ЗЦ

Фиг.2.6. Избор на вариант за заземяване на ЗЦ на разпределителна мрежа за СН с ВЕ с отчитане на ограниченията

Използването на алгоритъма за определяне на оптималния вариант за заземяване на ЗЦ на електрическа мрежа за СН са показани на фиг.2.6.

В съответствие с алгоритъма от фиг.2.5 изборът на оптимален вариант с отчитане на комплексните теглови коефициенти по избраните критерии се извършва само, когато ограничителните условия са спазени (фиг.2.6). Когато условието за големината на тока на ЕЗС или дължината на мрежата не е спазено, но няма условия за възникване на ферорезонанс, се препоръчва заземяване на ЗЦ през ДР (фиг.2.7). Ако и трите условия не са спазени, се преминава към заземяване през резистор (фиг.2.8).

Методиката е приложима за разпределителни мрежи, изградени с ВЕ и КЛ, а също без и с присъединени ДЕИ.

2.4. ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА ВТОРА

- Критериите за избор на оптимален тип заземяване на ЗЦ са: показателят за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване на ЗЦ.
- Ограниченията, които трябва да се спазват при избор на заземяване на ЗЦ в електрически мрежи за СН са: $I_3 > I_{3kr}$ и $l > l_{доп}$, при неспазването на които използването на изолиран ЗЦ е нецелесъобразно и е необходимо да се премине към режим на ЗЦ с компенсация на тока на ЗС.
- Съставената методика и алгоритъм за избор на заземяването на ЗЦ в разпределителни мрежи за СН включва разглеждане на три варианта по два критерия и отчита ограниченията от режимен и експлоатационен характер.
- Прилагането на метода за йерархичен анализ от теорията на игрите позволява да се определи оптималния вариант на заземяване на ЗЦ на електрическата мрежа за СН в според избраните критерии.

Глава трета

3. МЕТОДИКА ЗА ИЗБОР НА ЗАЩИТА ОТ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНИ ОГРАНИЧИТЕЛИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ

3.1. СЪСТАВЯНЕ НА АЛГОРИТЪМ ЗА ИЗБОР НА НЕЛИНЕЙНИ ОГРАНИЧИТЕЛИ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ

Нелинейните ограничители на пренапрежения се подразделят на следните групи:

- според големината на номиналния разряден ток: за 5 kA, 10 kA, 20 kA;
- по пропускателната способност при правоъгълен импулс на тока с продължителност 2000 μ s със съответна относителна енергия, отнесен към най-голямото продължително допустимо работно напрежение.

Остатъчните напрежения на НОП се задават при токови импулси 30/60 μ s, 8/20 μ s и 1/10 μ s с максимални стойности на импулсите.

За зададеното номинално напрежение U_n се отчита най-голямото работно напрежение на съоръженията ($U_{max p}$) и най-голямото продължително допустимо напрежение на мрежата ($U_{max доп}$).

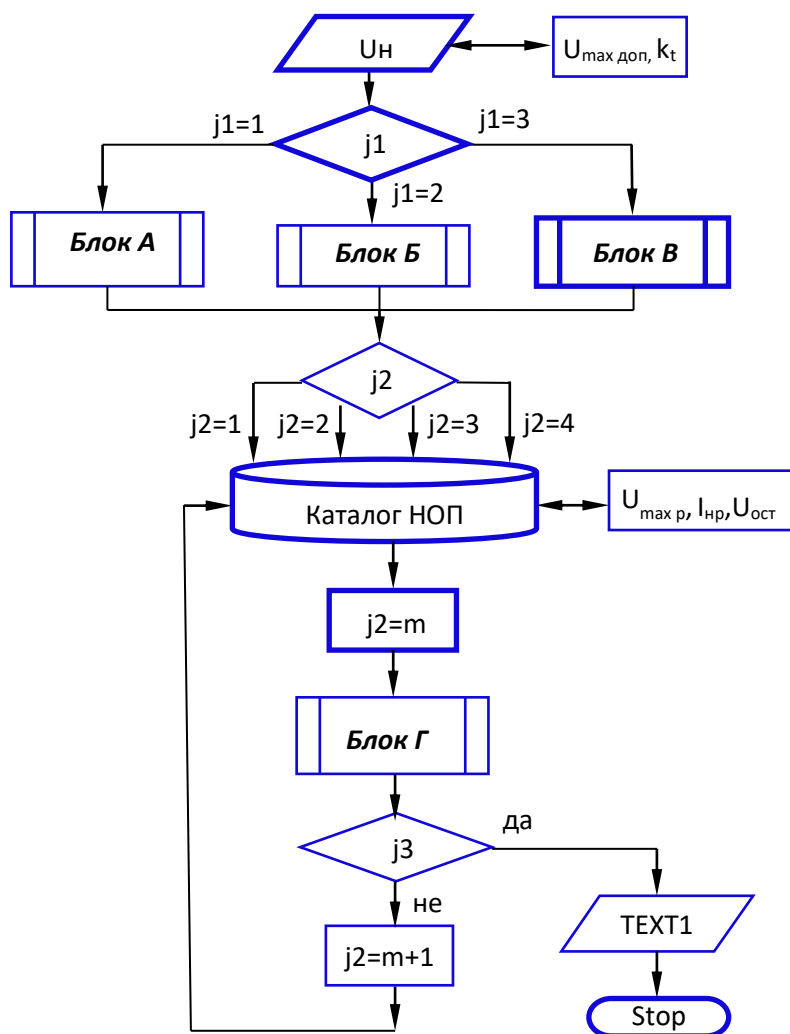
Основните избираеми параметри на НОП са следните:

- най-голямото продължително допустимо работно напрежение $U_{max доп}$;
- номиналният работен ток I_n ;
- остатъчното напрежение при нормирани токове;
- пропускателната способност, която се дефинира като нормираната максимална стойност на правоъгълния импулс на тока с продължителност 2000 μ s (ток на

пропускателната способност). НОП трябва да издържа 18 последователни въздействия без загуба на работоспособността си;

- относителна енергия - това е енергията, разсейвана от НОП, получена при прилагане на един токов импулс на с пропускателна способност, отнесена към големината на най-голямото продължително допустимо работно напрежение;
- дължината на пътя на утечка на външната изолация.

Блоквата схема на съставения алгоритъм за избор на НОП е показана на фиг.3.1.



Фиг.3.1. Блокова схема на алгоритъма за избор на НОП

В алгоритъма за избор на НОП са въведени следните параметри:

- номиналното напрежение на мрежата (U_n);
- начина на заземяване на ЗЦ (j_1).

В зависимост от зададеното номинално напрежение U_n , се отчита най-голямото продължително допустимо напрежение на мрежата $U_{\max \text{ доп}}$.

Ако продължителността на еднофазното земно съединение (ЕЗС) се ограничава, стойността на най-голямото продължително допустимо работно напрежение се коригира с коефициента k_t .

Според стойността на индекса j_1 за начина на заземяване на ЗЦ се преминава към отчитане на особеностите съответно при: $j_1=1$ – изолиран ЗЦ (Блок А); $j_1=2$ – ЗЦ, заземен през активно съпротивление (Блок Б) и $j_1=3$ – ЗЦ, заземен през ДГР (Блок С).

С индекс j_2 се задава номиналното напрежение на НОП, съответно: $j_2=1$ – за номинално напрежение 6 kV; $j_2=2$ за 10 kV; $j_2=3$ за 20 kV и $j_2=4$ за 35 kV.

От „Каталог НОП“ се избира НОП и се отчитат неговите характеристики. В резултат на изпълнение на работата на блок Каталог-НОП се избира конкретен НОП и индекс j_2 придобива стойност $j_2=m$.

С блок Г се изпълнява първия етап на проверката на условията за избор на НОП за конкретните изчислителни условия. Ако всички условия са изпълнени се приема избрания тип прекъсвач $j_2=m$, изписва се TEXT1 за типа на прекъсвача m и се преминава към следващите два етапа за избора на НОП. В противен случай се избира нов тип прекъсвач ($j_2=m+1$) и процедурата се повтаря да удовлетворяване на условията за избор на НОП.

3.2. ОПИСАНИЕ НА БЛОКОВЕТЕ В СТРУКТУРНАТА СХЕМА НА АЛГОРИТЪМА ЗА ИЗБОР НА НЕЛИНЕЙНИ ОГРАНИЧИТЕЛИ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯТА

Характеристиките на НОП, които се задават от блок „Каталог НОП“ на фиг.3.1, са:

- най-голямото работно напрежение на съоръжението (U_{maxp});
- характеристиката „напрежение - време“;
- остатъчното напрежение при:
 - атмосферен импулс на ток с форма 8/20 μs ;
 - комутационен импулс на ток с форма 30/60 μs ;
 - стръмен импулс на ток с форма 1/10 μs .
- номиналният разряден ток на НОП при атмосферни пренапрежения;
- импулсът на тока с форма 4/10 за оценка на устойчивостта на НОП при пряко попадение на мълния;
- токът на пропускателната способност при токов импулс с голяма продължителност, която характеризира способността на НОП да разсейва енергията при комутационните пренапрежения;
- разсейваната (поглъщаната) енергия (термична неустойчивост на НОП);
- относителната разсейвана енергия, определяща пропускателната способност.

Продължителността на съществуване на еднофазно земно съединение се нормира в зависимост от вида на електрическата мрежа:

- за мрежа, захранвана от генератори – 2 h;
- във въздушно-кабелна мрежа – без ограничаване на времето.

Номиналният разряден ток (I_{np}) на НОП се избира:

- 5 kA - за мълниезащита;
- 10 kA в случаите:
 - на интензивна мълниеносна дейност над 50 атмосферни часа за година;
 - в схемите с въртящи се електрически машини;
 - в райони с висока степен на промишлена замърсеност;
 - при повишени изисквания за мълниезащита.

При избора на защитното ниво на НОП предназначението му е определящо: за защита от атмосферни или от комутационни пренапрежения. Взема се предвид нивото на издържаните пренапрежения от изолацията на електрическите съоръжения.

Остатъчното напрежение на НОП ($U_{ост}$) при атмосферни пренапрежения трябва да бъде не по-голямо от дадените стойности в таблица 3.4.

Таблица 3.4. Максимална стойност на остатъчното напрежение при атмосферно пренапрежение на НОП

Номинално напрежение на съоръженията, kV	6	10	20	35
Напрежение при импулс 8/20 ms с амплитуда 5 kA, до kV	27	45	80	130

Препоръчителните граници на тока на пропускателната способност на НОП са зададени в „Каталог НОП“ от фиг.3.1 в съответствие с таблица 3.5.

Таблица 3.5. Препоръчителни граници на тока на пропускателната способност на НОП

Номинално напрежение, kV	6	10	20	35
Относителна енергия W, kJ/kV	2-3	2-3	2-3	2-3
Импулс 2000 μ s с амплитуда, A	400-600	400-600	400-600	400-600

Минималната дължина на пътя на тока на утечка на външната изолация на НОП е дадена в таблица 3.6.

Таблица 3.6. Минималната дължина на пътя на тока на утечка на външната изолация на НОП

Номинално напрежение, kV	6	10	20	35
Дължина на пътя на тока на утечката, cm, над	13	22	43,2	75

Дължината на пътя на утечката на изолацията на НОП в условията на степен на замърсяване I трябва да е над 1,6 cm/kV, а при степен на замърсяване II, III, IV – съответно над 2,0; 2,5; 3,1 cm/kV.

В блокове А, Б и В от фиг.3.1 се отчитат особеностите в зависимост от начина на заземяване на ЗЦ.

Първата стойност, необходима за избиране на работното напрежение U_c на НОП, е напрежението, приложено към клемите на ограничителя при нормални, не аварийни условия. Това зависи от това дали НОП е свързан между фаза и земя, между фазите на електропровода или между звездния център (ЗЦ) и земя. Обикновено напрежението може да се изчисли от максималното напрежение между линията на системата. Ако това напрежение е неизвестно или се променя с течение на времето, се взема най-високото напрежение за съоръжението ($U_{max p}$).

В трифазни системи могат да възникнат временни пренапрежения след земни съединения и тяхната големина се определя от условията на заземяване на ЗЦ. Продължителността на пренапрежението зависи от мрежовите условия.

Големината на очакваното временно пренапрежение често се определя с помощта на фактор (χ). Временното пренапрежение (U_T) след това се изчислява като:

$$U_T = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \chi \quad (3.1)$$

а) Мрежи с компенсация на капацитивния ток на земно съединение или при заземяване на ЗЦ през голямо активно съпротивление:

- $U_c \geq U_m$ - работното напрежение (U_c) не трябва да превишава U_m за НОП, включен между фаза и земя.
- $U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ - максималното напрежение на ЗЦ на трансформатора за НОП, монтиран между ЗЦ на трансформатора и земята.

При резонансни явления фактор χ може да достигне да 1,85. Тогава напрежение $U_{max \phi}$ трябва да се увеличи.

б) Мрежи със ЗЦ, заземен през голямо съпротивление и с релейна защита от з.с.:

- $U_c \geq \frac{U_m}{k_t}$ - за НОП, включен между фаза и земя;
- $U_c \geq \frac{U_m}{k_t \sqrt{3}}$ за НОП, включен между ЗЦ на трансформатора и земята; където k_t е коефициента, отчитащ продължителността на ЕЗС.

в) Мрежи със заземяване на ЗЦ през малко активно съпротивление при $\chi < 1.4$

Ако голям брой трансформатори са със ЗЦ, заземен през малко активно съпротивление, факторът $\chi \leq 1.4$ за цялата мрежа. Може да се използва НОП с по-ниско работно напрежение U_c :

- $U_c \geq \frac{1,4.U_m}{k_t \sqrt{3}}$ за НОП, поставен между фаза и земя.
- $U_c \geq \frac{0,4.U_m}{k_t}$ за НОП, включен между ЗЦ на трансформатора и земята.

г) Мрежи със заземяване на ЗЦ през малко активно съпротивление при $\chi > 1.4$

$$U_c \geq \frac{1,05.U_m}{k_t} \quad (3.2)$$

В Блок Г на фиг.3.1 се извършва избор по параметрите, получени от „Каталог-НОП“ по следните четири условия:

- **Условие 1:** Продължителното допустимо напрежение на мрежата $U_{\max \text{ доп}}$ трябва да е по-голямо или равно на най-голямото работно напрежение на съоръжението $U_{\max p}$, (по алгоритмично заложените данни)

$$U_{\max \text{ доп}} \geq U_{\max p} \quad (3.3)$$

- **Условие 2:** Остатъчното напрежение $U_{\text{ост}}$ е максималната стойност на напрежението на изводите на НОП при протичане през него на токов импулс със зададена форма. По данните за характеристиките на НОП от „Каталог-НОП“ се проверява защитното ниво съответно при атмосферни и комутационни пренапрежения. Защитното ниво на НОП при атмосферни пренапрежения съответства на токов импулс с форма 8/60 μs , а при комутационни пренапрежения - 30/60 μs . Амплитудната стойност на токовия импулс се определя чрез изчисляване на преходния процес при възникване на атмосферни или комутационни пренапрежения.

$$U_{\text{ост}} \leq \sqrt{2} k_{\text{дон}} U_{\max \text{ доп}}, \quad (3.4)$$

където $k_{\text{дон}}$ е допустимата кратност на пренапреженията.

- **Условие 3:** – Относителната енергоемкост $W_{\text{отн}}$, kJ/kV е отношението на отделяната енергия в НОП при подаване на нормиран импулс на тока при пренапрежение към $U_{\max \text{ доп}}$, kV. Погълъзаната енергия $W_{\text{пог}}$, kJ, при ограничаване на пренапреженията не трябва да превишава енергоемкостта на НОП:

$$W_{\text{отн}} \leq \frac{W_{\text{пог}}}{U_{\max \text{ доп}}} \quad (3.5)$$

- **Условие 4:** За дължината на пътя на утечката (H,cm) на НОП е необходимо:

$$H \geq H_{\text{отн}} U_{\max \text{ доп}}, \quad (3.6)$$

където $H_{\text{отн}}$ е относителната дължина на пътя на утечката на изолацията на НОП, която при степен на замърсяване I трябва да е над 1,6 cm/kV, а при степен на замърсяване II,III,IV – съответно над 2,0; 2,5; 3,1 cm/kV.

3.3. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ТОКА ПРЕЗ НЕЛИНЕЙНИТЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ

Остатъчното напрежение на НОП се определя от неговата волтамперна характеристика

$$U_{\text{ост}} = A I_{\text{НОП}}^{\alpha}, \quad (3.7)$$

където A и α са константите на волтамперната характеристика на НОП.

Средната стойност на тока през НОП ($I_{НОП}$) и времето за неговото протичане (Δt) се изразява с

$$I_{НОП} = \left[\frac{\pi}{8AZ} \frac{U_{\max}^2 - (A I_{НОП}^\alpha)^2}{\arccos \frac{A I_{НОП}^\alpha}{U_{\max}}} \right]^{\frac{1}{1+\alpha}}; \quad (3.8)$$

$$\Delta t = \frac{4l}{\pi v} \arccos \frac{A I_{НОП}^\alpha}{U_{\max}}, \quad (3.9)$$

където $U_{\max}$ е максималното напрежение през НОП; Z – вълновото съпротивление на линията; v – скоростта на разпространение на електромагнитната вълна; l – дължината на линията.

Остатъчното напрежение на НОП ограничава комутационните и атмосферните пренапрежения в мястото на монтаж на НОП. За определяне на тока през НОП е необходимо да се изчисли параметърът A с изрази

$$A = \frac{1,25 \sqrt{2} U_{\max p}}{0,001^\alpha} = 1,25 \cdot 10^{3\alpha} \sqrt{2} U_{\max p}, \quad (3.10)$$

където $U_{\max p}$ е най-голямото работно линейно напрежение.

Токът $I_{НОП}$ през НОП и времето за неговото протичане Δt , след отчитане на изрази за параметърът A от уравнение (3.10), се определят с:

$$I_{НОП} = \left[\frac{\pi 10^{-3\alpha} \sqrt{2} U_{н.р.} \left(\frac{U_{\max}}{\sqrt{2} U_{\max \phi}} \right)^2 - 4,68 \cdot 10^{6\alpha} I_{НОП}^{2\alpha}}{30Z \arccos \frac{\sqrt{2} U_{\max \phi}}{U_{\max}} \cdot 2,16 \cdot 10^{3\alpha} I_{НОП}^\alpha} \right]^{\frac{1}{1+\alpha}}; \quad (3.11)$$

$$\Delta t = \frac{4l}{\pi v} \arccos 3,06 \left(\frac{U_{\phi.н.р.}}{U_{\max}} \right) I_{НОП}^\alpha \quad (3.12)$$

където $U_{\max \phi}$ е най-голямото работно фазно напрежение.

Остатъчното напрежение в електрически мрежи с изолиран ЗЦ при комутационни пренапрежения е над $1,8 U_{\max p}$ или $1,8 \sqrt{3} U_{\max \phi} = 3,1 U_{\max \phi}$. Следователно пренапреженията с ниво под $3,1 U_{\max \phi}$ не се ограничават от НОП, ако токът през него съответства на изчислителния. При по-малък ток остатъчното напрежение на НОП е под $3,1 U_{\max \phi}$ и съответно се ограничават пренапрежения с по-малка кратност.

3.5. ПОЛУЧАВАНЕ НА МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТОКА ПРЕЗ НЕЛИНЕЙНИТЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ НА ПРЕНАПРЕЖЕНИЯТА

Изчислението на тока $I_{НОП}$ през НОП с израз (3.11) е затруднено. За опростяване на изчисленията се съставя математичен модел с прилагане на теорията за планиране на

експеримента. За целта, след уточняване на оценявания параметър $I_{\text{НОП}}$, се конкретизират независимите влияещи фактори и границите на тяхното изменение. Избира се линеен модел от първи ред за два влияещи фактора:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2, \quad (3.24)$$

където y е оценъчният параметър; x_1, x_2 - влияещите фактори в кодиран вид; a_0, a_1, a_2, a_{12} - коефициенти на регресионното уравнение.

От т.3.2 се установява, че върху тока през НОП оказват влияние няколко фактора, които могат да се групират, както следва:

- фактор X_1 – дължината на електропровода;
- фактор X_2 – сечението на проводника, от големината на което зависят:
 - индуктивността L_0 и капацитета C_0 за единица дължина на линията;
 - вълновото съпротивление Z и скоростта на разпространение на електромагнитната вълна v .

От зададеното номинално напрежение зависят електрическите режимни параметри на НОП. По тази причина математичният модел се създава за конкретно номинално напрежение. Особеностите на начина на заземяване на ЗЦ са алгоритмично заложи в разработения софтуер.

Формиране на независимите влияещи фактори за електрическа мрежа с номинално напрежение 35 kV са дадени в таблица 3.7, а планът на експеримента е показан в таблица 3.8.

Таблица 3.7. Нива на изменение на влияещите фактори

№	Характеристики	Дължина L , km	Сечение на проводника, s , mm ²
1.	Основно ниво ($x_j = 0$)	55	65
2.	Интервал на вариране y_j	15	30
3.	Горно ниво ($x_j = +1$)	70	95
4.	Долно ниво ($x_j = -1$)	40	35
5.	Код на фактора	x_1	x_2

Таблица 3.8. План на експеримента

№	x_1	x_2	$\bar{y}$
1	-1	-1	136
2	+1	-1	122
3	-1	+1	146
4	+1	+1	130

Изчисляваният параметър y_i по плана на експеримента е токът $I_{\text{НОП}}$ през НОП. В изчисленията за номинално напрежение 35 kV за фактор X_1 , който е дължината на линията се приема: долна граница 40 km и горна граница 70 km (таблица 3.7). Големините на фактора X_2 (сеченията на проводника) са зададени в таблица 3.7. За тях се отчитат индуктивността L_0 и капацитета C_0 за единица дължина на линията и се изчисляват вълновото съпротивление Z и скоростта на разпространение на електромагнитната вълна v .

В зависимост от номиналното напрежение се отчитат най-голямото работно напрежение на съоръженията $U_{\text{max р}}$ и най-голямото продължително допустимо напрежение на мрежата $U_{\text{max доп}}$. Изчислява се токът $I_{\text{НОП}}$ с уравнение (3.11) съгласно

плана на експеримента и средните стойности на $\bar{y}$ от отделните опити са дадени в таблица 3.8.

Опитите във всяка точка от плана на експеримента при фиксираните стойности на влияещите фактори се извършват с изменение на индуктивността L_0 и капацитета C_0 за единица дължина на линията в зависимост от геометричното разположение на проводниците, използвани в разпределителни мрежи за 35 kV.

Проверката на еднородността на дисперсията на извършените измервания се извършва по критерия на Кохрен.

Получава се следният модел:

$$y = 133,5 - 7,5 \cdot x_1 + 4,5 \cdot x_2 - 0,5 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (3.31)$$

Проверка значимостта на коефициентите на регресия се извършва по критерия на Стюdent при 5%-ово ниво на значимост.

Адекватността на математичния модел се проверява по критерия на Фишер, съгласно който моделът (3.31) е адекватен.

Ако в модела (3.31) се постави кодираната стойност на влияещите фактори се получава същия резултат за $I_{НОП}$, както при изчисляването му с уравнение (3.11).

3.5. ИЗВОДИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

- Създадената методология и разработеният софтуер позволява да се избират НОП в разпределителни мрежи за СН с различен начин на заземяване на ЗЦ.
- Средната стойност на тока през НОП зависи от голям брой фактори, голяма част от които са взаимно зависими. При зададено номинално напрежение и начин на заземяване на ЗЦ се оказва че независимите влияещи фактори върху големината на тока през НОП са дължината на линията и сечението на проводника.
- Създаването на адекватен математичен модел за определяне на тока през НОП с помощта на теорията за планиране на експеримента значително опростява изчислителната процедура.

Глава четвърта

4. ЗАЩИТА ОТ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ, СЪОРЪЖЕНИ С ВАКУУМНИ ПРЕКЪСВАЧИ

4.1. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ЗАЩИТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ, СЪОРЪЖЕНИ С ВАКУУМНИ ПРЕКЪСВАЧИ

В електрическите уредби за СН, съоръжени с вакуумни прекъсвачи, независимо от начина на заземяване на ЗЦ, се предвиждат средства за защита от комутационни пренапрежения. През последните години най-използваните защитни съоръжения срещу пренапрежения са НОП. За разлика от вентилните отводи, НОП могат да ограничават както атмосферните, така и комутационните пренапрежения в електрическите съоръжения за всички номинални напрежения.

Целта е да се разработи методика и алгоритъм за избор на НОП за защита на електрическите уредби за СН, съоръжени с вакуумни прекъсвачи.

Съвременните схеми на мощните електрически централи (ЕЦ) се характеризират с добре развита мрежа за собствени нужди (с.н.). Основният елемент на мрежата за с.н. в неблоковите ЕЦ са мощните асинхронни двигатели (АД) с номинално напрежение 6 kV, захранвани от трансформаторите за собствени нужди (ТСН) чрез отделни кабелни присъединения W_k . Общият брой на присъединенията към една секция е 20÷25. Подобна схема се използва и за захранване на синхронни двигатели (СД) и АД в промишлените предприятия. В блоковите ЕЦ електроснабдяването на АД се извършва от секциите за с.н., които се захранват от тринамотъчните ТСН.

Комутацията на високоволтовите двигатели се извършва чрез вакуумните прекъсвачи. В блоковите схеми се правят комутации на електрическите двигатели в процеса на автоматично включване на резервирането (АВР) и изключване на претоварени електрически двигатели и др. Всички комутации се съпровождат с пренапрежения с различна кратност и честота.

Опасни пренапрежения се създават при изключване на ЕД, изпаднал в режим на асинхронен ход. Най-опасен е момента на изключване на първата фаза, съвпадащ с противофазното положение на е.д.н. на мрежата и вътрешното е.д.н. на електродвигателя. Максималната кратност на напрежението достига стойност 4,47, а изключването на другите две фази е при по-малки пренапрежения (с кратност 2,43).

Ограничението на комутационните пренапрежения при включване и изключване на електродвигателя практически се осъществява най-ефективно с НОП.

4.2. КОМУТАЦИОННИ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ, СЪЗДАВАНИ ОТ ВАКУУМНИТЕ ПРЕКЪСВАЧИ

Високоволтовите вакуумни прекъсвачи се предпочитат в схемите на разпределителните уредби поради основните им предимства: висока надеждност, висок механичен и комутационен ресурс, бързодействие и безшумна работа; пожаро и взривобезопасност, минимални експлоатационни разходи и др. Те могат да се прилагат при необходимост от чести комутации на работните токове.

Някои от особеностите при гасене на дъгата във вакуумните прекъсвачи (например многократните повторни запалвания) понякога водят до пренапрежения с високи кратности, които в мрежи СН се наблюдават и при други типове прекъсвачи (въздушни, маломаслени).

На базата на експлоатационния опит и данни за големините на пренапреженията при изключване с вакуумни прекъсвачи на електродвигатели и трансформатори може да е направил следното обобщение:

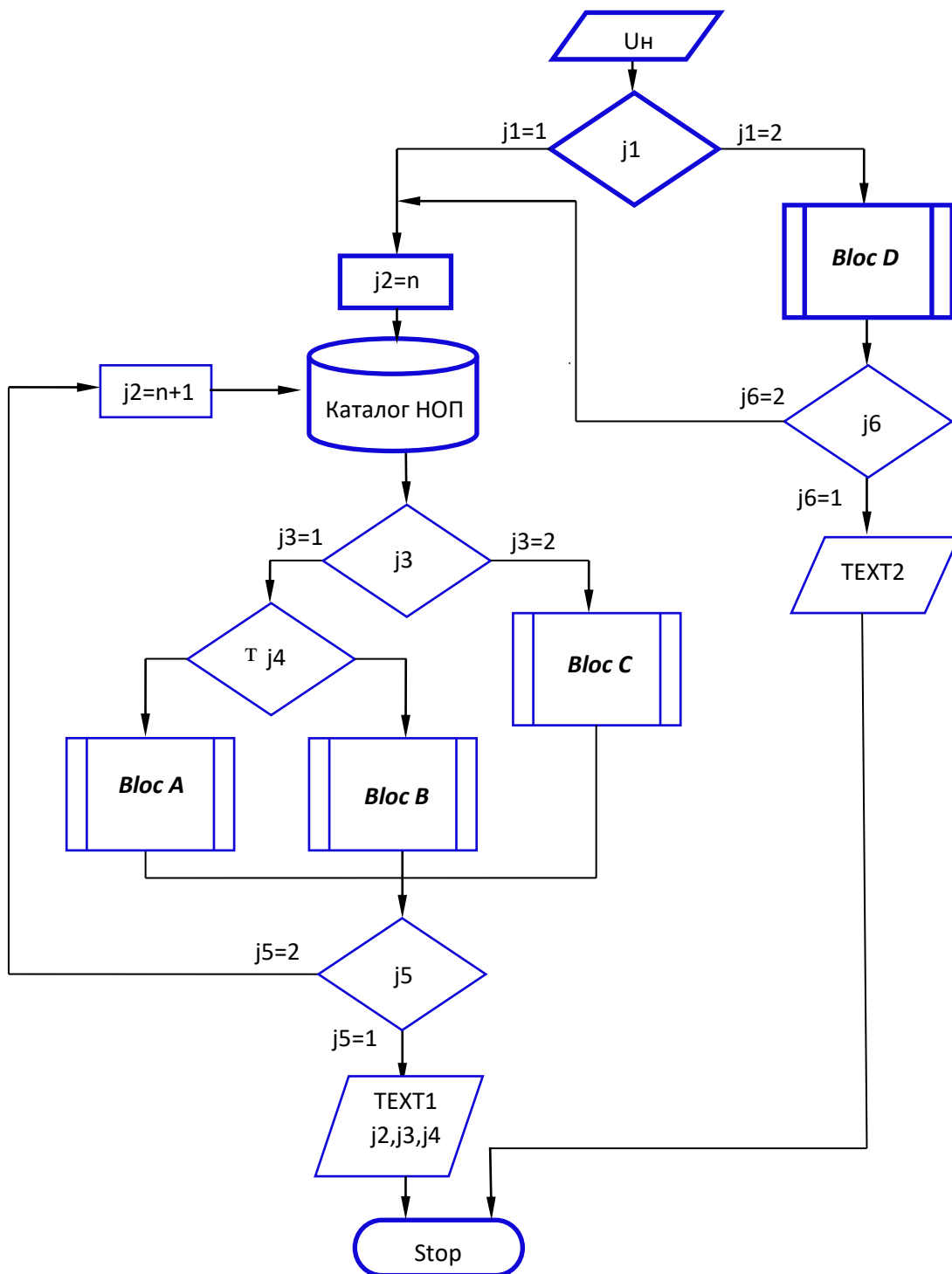
- натурни изпитания на електродвигатели с напрежение 6 kV и мощност от 110÷520 kW при различни дължини на захранващите кабели при комутации с маломаслени, въздушни и вакуумни прекъсвачи. Кратностите на пренапреженията за маломаслените прекъсвачи са най-високи и достигат до 6÷9 спрямо амплитудата на фазното напрежение. Кратностите на пренапреженията за вакуумни прекъсвачи достигат до 4÷5 при мощност на ЕД до 730 kW.
- Кратностите на пренапреженията за вакуумни прекъсвачи при мощност на електродвигателите с мощност над 1 MW са по-малки в сравнение с кратностите при електродвигателите с по-малка мощност.
- Данните за пренапреженията, при изключване от вакуумните прекъсвачи на ненатоварен силов трансформатор в разпределителните мрежи за СН показват, че не възникват опасни пренапрежения. Пренапрежения обаче могат да възникнат от неустановилия се намагнитващ ток.

Причините, предизвикващи пренапрежения при функциониране на вакуумните прекъсвачи, са:

- срязване на тока до нулева стойност и освобождаване на запасената енергия в индуктивните елементи на схемата;
- недостатъчна диелектрична якост на междунтактното пространство в началния интервал след прекъсване на тока на дъгата;
- срязване на тока в съседните фази, предизвикващо повторно запалване на дъгата в първата изключена фаза;
- възможност за многократни пробиви, съпровождащи гасенето на дъгата.

4.3. МЕТОДИКА ЗА ИЗБОР НА ЗАЩИТА ОТ ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ, СЪОРЪЖЕНИ С ВАКУУМНИ ПРЕКЪСВАЧИ

Блоковата схема на разработения алгоритъм за избор на НОП в електрически мрежи за средно напрежение, защитени с вакуумни прекъсвачи, е представена на фиг.4.7.



Фиг.4.1. Блокова схема на алгоритма за избор на НОП за електрически съоръжения, снабдени с вакуумни прекъсвачи

Въвеждат се данни за номиналното напрежение (U_n) и индексите: $j1$ – индекс за вида на защитаваното съоръжение, който може да придобие стойност: $j1=1$ – електродвигател; $j1=2$ – силов трансформатор; $j2$ – индекс за типа на НОП, според който от файла „Каталог-НОП“ се отчитат данните му (например за $j2=n$); $j3$ – индекс за начина на монтаж на НОП: $j3=1$ – НОП между фаза и земя; $j3=2$ – монтаж на шина; $j4$ – индекс за мястото на монтаж на НОП: $j4=1$ – при капацитивен ток $I_c > 10$ А и НОП, монтиран между фаза и земя на клемите на защитаваното съоръжение; $j4=2$ – при капацитивен ток $I_c < 10$ А и НОП, монтиран между фаза и земя на захранващия край на кабела с дължина $l < 50$ m.

В блоковата схема на алгоритма от фиг.4.7 с Bloc A, Bloc B, Bloc C са означени блоковете за проверка на условията за избор на НОП. В края на изпълнението на всеки от тези блокове се придобива съответно индекс $j5=1$ – при удовлетворяване на всички изисквания и $j5=2$ – при неудовлетворяване на поне едно от изискванията към НОП.

Ако в резултат на изпълнение на алгоритма в Bloc A, Bloc B или Bloc C се придобие индекс $j5=2$, не е удовлетворено някое от изискванията към НОП, се преминава към файла „Каталог-НОП“ и се избира следващия НОП и проверката на условията се извършва повторно.

Цикълът продължава докато избраният НОП удовлетвори всички условия и в Bloc A, Bloc B или Bloc C се придобие индекс $j5=1$ (т.е. изпълнени са всички изисквания). Bloc D е блокът за проверка на необходимостта от защита на силови трансформатори от пренапрежения, предизвикани от комутации на вакуумни прекъсвачи; при изпълнението на блока се придобива индекс $j6$ със стойности съответно:

- $j6=1$ – изискванията са спазени и трансформатора не се нуждае от защита;
- $j6=2$ – трансформаторът се нуждае от защита с НОП.

SN C:\Simulateur\TVN\Petya

Изчислителен режим:	Пренапрежение ▼	Вид защитавано съоръжение, j1: Двигател
Номинално напрежение, kV	6 ▼	Проверка на условията за избор на НОП: ▼ Условие 1 : $U_{раб} = 6kV \geq U_n = 6kV$ Условие 2 : $U_{пр ОПП} = 6,6kV \geq 6,6kV$ Условие 3 : $U_{остк} = 16,5kV \leq 18,5kV$ Условие 4 : $I_{nn} = 450A > 400A$
Тип на НОП, j2	1 ▼	
Начин на монтаж на НОП, j3	1 ▼	
Място на монтаж на НОП, j4	1 ▼	
Сумарна дължина, m	40 ▼	
• Избран НОП с данни:		
Работно напрежение, kV	6 ▼	
$U_{пр\ НОП}$ - ефективната стойност на най-голямото продължително допустимо работно напрежение на НОП, kV		6,6
$U_{в\ НОП}$ - ефективната стойност на издържаното напрежение от НОП при промишлена честота в продължение на време $t_b=10$ s, kV		8,5
$U_{остк}$ – ефективната стойност на остатъчно комутационно напрежение, kV		16,5
Пропускателна способност (20 импулсен ток с правоъгълна форма), A		450

Фиг.4.9. Избор на НОП за електрически съоръжения, снабдени с вакуумни прекъсвачи

С блок ТЕХТ 1 се изписва избрания тип НОП (j2), начина (j3) и мястото (j4) на неговия монтаж към защитаваното съоръжение и проверените изпълнени условия за избрания НОП. С блок ТЕХТ 2 се изписва, че трансформаторът не се нуждае от защита с НОП.

За избрания тип НОП се отчитат каталожните данни: $U_{\text{раб}}$ - ефективната стойност на работното напрежение, kV; $U_{\text{пр ноп}}$ - ефективната стойност на най-голямото продължително допустимо работно напрежение на НОП, kV; $U_{\text{в ноп}}$ - ефективната стойност на издържаното напрежение от НОП при промишлена честота в продължение на време $t_{\text{в}}$, kV; $U_{\text{ост к}}$ - ефективната стойност на остатъчното комутационно напрежение, kV.

Тези стойности се използват за проверка на условията в блокове Bloc A, Bloc B и Bloc C. Реализацията на алгоритма от фиг.4.7 е представена на фиг.4.9.

Изчисленията с алгоритма от фиг.4.7 могат да бъдат извършени за различни типове НОП.

4.4. ИЗВОДИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

- Методиката и софтуерът позволяват обективно да се избира НОП за електрически мрежи, снабдени с вакуумни прекъсвачи.
- Параметрите на НОП не зависят от режима на заземяване на ЗЦ. По тази причина разработената методика и съставеният алгоритъм са приложими за избор на НОП при различни режими на ЗЦ в електрически мрежи за СН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-важните приноси в дисертацията са следните:

- Прилага се метода за йерархичен анализ от математичната теория на игрите за избор на оптимален вариант за заземяване на звездния център на разпределителни мрежи за средно напрежение. Разглеждат се три варианта: изолиран звезден център, заземен през резистор и през дъгогасителен реактор. Критериите за избор на оптималния тип заземяване на звездния център са: показателят за ефективност на режима и допълнителните разходи за изграждане на съответния тип заземяване на звездния център. Математичният апарат на теорията на игрите се прилага за трите варианта и двата избрани критерия. Съставен е алгоритъм, който позволява да се въвежда различен коефициент на тежест на двата критерия, в съответствие с конкретно разглежданата електрическа мрежа. Резултатите от изчисленията дават оптималния вариант на заземяване на звездния център на електрическата мрежа за средно напрежение в според избраните критерии.
- Създадена е методология и е разработен софтуер, които позволяват да се избират нелинейни ограничители на пренапрежения в разпределителните мрежи за средно напрежение с различен начин на заземяване на звездните центрове. Средната стойност на тока през НОП зависи от голям брой фактори, голяма част от които са взаимно зависими. При зададено номинално напрежение и начин на заземяване на звездния център се оказва, че независимите влияещи фактори върху големината на тока през нелинейния ограничител на пренапреженията са дължината на линията и сечението на проводника. Създаден е адекватен математичен модел за определяне на тока през нелинейния ограничител на

пренапреженията с помощта на теорията за планиране на експеримента, с което значително се опростява изчислителната процедура.

- Разработена е методика и алгоритъм за избор на нелинейни ограничители на пренапрежения за защита на електрическите уредби за средно напрежение, съоръжени с вакуумни прекъсвачи. В алгоритъма се отчитат особеностите, пораждани от комутациите на вакуумните прекъсвачи. Алгоритъмът и създаденият софтуер са приложими за електрически мрежи за средно напрежение с различни видове заземявания на звездния център.

Публикации по дисертацията на маг.инж. Христо Стефанов Илчев

1. Неделчева С.И., Х.С. Илчев. Критерии за избор на вида на заземяването на звездния център в електрическа мрежа за средно напрежение. ISSN 1312-3920, Известия на ТУ-Сливен, № 4, 2020.
2. Nedeltcheva S.I., H.Ilchev. Choice of the type of grounding the neutral in a medium voltage electrical network. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, Volume 8, Issue 3, March - 2021.
3. Неделчева С.И., Х.С. Илчев. Методика за избор на вариант за заземяване на звездния център в разпределителни мрежи за средно напрежение. ISSN 1312-3920. Известия на ТУ-Сливен, № 1, 2021, стр.3-6.
4. Илчев Х.С. Защита от пренапрежения в електрически мрежи за средно напрежение, съоръжени с вакуумни прекъсвачи. ISSN 1312-3920. Известия на ТУ-Сливен, № 1, 2021. стр.15-18.
5. Илчев Х.С. Методика за избор на нелинейни ограничители на пренапрежения в разпределителните мрежи. ISSN 1312-3920. Известия на ТУ-Сливен, № 2, 2021, стр.3-8.
6. Неделчева С.И., Х.С. Илчев. Математичен модел за определяне на тока през нелинейните ограничители на пренапреженията. ISSN 1312-3920. Известия на ТУ-Сливен, № 2, 2021, стр.9-13.

PROTECTION OF SMART ELECTRICAL DISTRIBUTION GRIDS

Hristo Stefanov Ilchev

The most important contributions in the dissertation are the following:

- The method of hierarchical analysis from the mathematical theory of games has been applied to select an optimal variant for star center grounding in medium voltage distribution networks. Three options have been considered: an insulated star center; a star center grounded through a resistor; and a star center grounded through an arc-suppression reactor. The criteria for selecting the optimal type of grounding of the star center are the efficiency indicator for the mode of operation and the additional costs for construction of the respective type of star center grounding. The mathematical apparatus of the game theory has been applied to the three variants and the two selected criteria. An algorithm has been developed, allowing to introduce a different weighting factor for the two criteria, in accordance with the specific electrical network under consideration. The results from the calculations give the optimal variant of grounding the star center in the medium-voltage electrical network according to the selected criteria.
- A methodology has been presented and software developed, allowing to select nonlinear surge arresters (NSA) in medium voltage distribution networks with different types of star center grounding. The average value of the current through the NSA depends on a large number of factors, many of which mutually dependent. Having a rated voltage and a star center grounding method given, the independent factors, influencing on the value of the current through the non-linear surge arrester turn out to be the length of the line and the cross-section of the conductor. An adequate mathematical model for determining the current through the nonlinear surge protector has been created with the help of the theory of experimental planning, which significantly simplifies the computational procedure.
- A methodology and algorithm for selection of nonlinear surge arresters for protection of the medium voltage electrical installations, equipped with vacuum circuit breakers, have been developed. The algorithm considers the features, caused by the switching of the vacuum circuit breakers. The algorithm and the created software are applicable for medium voltage electrical networks with different types of star grounding.