



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

Маг.инж. Стоян Петров Петров

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**Изследване на следаварийните режими в
електрическите разпределителни мрежи с
децентрализирани генериращи източници**

Докторска програма “Електрически мрежи и системи”

Професионално направление 5.2. „Електротехника, електроника
и автоматика”

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 на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-81 от 27.07.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д.т.н. инж. Чавдар Иванов Дамянов
2. проф. д-р инж. Стефка Иванова Неделчева
3. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов
4. доц. д-р инж. Лилия Анестиева Станева
5. доц. д-р инж. Стоян Христов Божков

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Никола Петров Михайлов
2. доц. д-р инж. Стоян Христов Божков

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

Дисертантът е докторант в задочна 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. Стоян Петров Петров

Заглавие: Изследване на следаварийните режими в електрическите разпределителни мрежи с децентрализирани генериращи източници

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В експлоатация се срещат много нетрадиционни потребители с несиметричен характер на товара, което води до влошаване на качеството на електроенергия и понижаване на ефективността на работа. Режимът на несиметрия е значителен в разпределителните мрежи за ниско напрежение (НН), поради наличието на голям брой еднофазни потребители. Несиметрията на напреженията и токовете в мрежата за НН и средно напрежение (СН) понякога превишава нормираната стандартна стойност.

През последните години бяха въведени в експлоатация голям брой децентрализирани електроенергийни източници (ДЕИ), изградени на базата на възобновяемите енергийни ресурси. Децентрализираните производители на електроенергия предизвикват изменения в режимните параметри, поради промяна на експлоатационната схема: включване или изключване на ДЕИ, което създава участъци съответно с двустранно и едностранно захранване. С това се променят режимните параметри както в нормални, така и в следаварийни режими, за които електрическата мрежа е изчислена преди присъединяване на ДЕИ. Присъединените ДЕИ внасят несиметрии при експлоатация на разпределителните мрежи.

Възникващите непълнофазни режими създават надлъжни несиметрии в електрическата мрежа, което е честа причина за отклонение на показателите за качество на електроенергията извън нормираните стойности.

Следователно изменението на пропускателната способност на елементите на електрическата мрежа, несиметричните и непълнофазните режими, внасяни от ДЕИ, са актуални задачи за изследване.

С особена значимост е възникването на индуцирани напрежения в изключен фазов проводник от останалите включени фазови проводници на трифазен електропровод. При тези непълнофазни режими съществува опасност от възникване на допирни напрежения, превишаващи допустимите стойности, регламентирани в действащата нормативна уредба.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на изследването е анализ на нормалните и следаварийните режими в електрически мрежи с ДЕИ.

Обектът на изследването са разпределителните електрически мрежи с ДЕИ.

Предметът на изследването: следаварийните режими в електрически мрежи с ДЕИ

Нерешените проблеми по темата са следните:

- няма методика и алгоритъм за определяне на пропускателната способност в нормален и следаварийен режим в разпределителни мрежи с ДЕИ;
- няма създадена методика за изследване на несиметричните и непълнофазните режими в разпределителни мрежи с ДЕИ;
- не е публикувана методика за моделиране на индуцираното напрежение в изключен проводник на трифазен електропровод.

Основните задачи за решаване в дисертацията са следните:

- да се създаде методика и алгоритъм за определяне на пропускателната способност в нормален и следаварийен режим в разпределителни мрежи с ДЕИ;
- да се разработи методика и софтуер за изследване на несиметричните режими в разпределителни мрежи с ДЕИ;
- да се състави методика за изследване на непълнофазните режими в разпределителни мрежи с ДЕИ;
- да се моделира индуцираното напрежение в изключен проводник на трифазен електропровод.

Научна новост

- Създадена е методика за определяне на големините на присъединяваните мощности от ДЕИ по условието за пропускателна способност в мрежи за НН и СН.

- Разработен е математичен модел за изчисляване на несиметричните режими на електрическите мрежи при различно съчетание на големините на мощностите на ДЕИ и потребителите.
- Създадена е методика за изчисляване на режимните параметри при несиметрии в електрическите мрежи за НН с отчитане групата на свързване на захранващия силов трансформатор.
- Съставен е математичен модел за изчисляване на непълнофазните режими на електрическите мрежи при различни експлоатационни условия.
- Получени са математични модели за определяне на големините на допирните напрежения, получавани при допир до изключен незаземен проводник на трифазна линия, поради предизвикано в него индуктиране на електростатичен потенциал от останалите неизключени фазови проводници.
- Съставени са математични модели, с които се определя допирното напрежение при изключен заземен фазов проводник, дължащо се на индуктиране на потенциал от неизключените фазови проводници. С разработеният софтуер може да се изчислява токът при допир на човек до изключен проводник и съпротивлението на заземителя, при което допирното напрежение е безопасно.

Практическа приложимост

Разработените методики и получените резултати са полезни за проектирането и експлоатацията на електрическите разпределителни мрежи с присъединени ДЕИ.

Апробация

Резултатите от дисертацията са апробирани на научни конференции SIMULTECH 2021, ICTTE, 2021 и БСУ, Бургас, 2020.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертацията са публикувани в 7 публикации, 1 от които самостоятелна. Четири от публикациите са в списание „Известия на ТУ-Сливен“, ISSN 1312-3920, а три са достъпни в Internet. Две от публикациите са реферирани по SCOPUS.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 138 страници, като включва въведение, 4 глави, заключение с основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 142 литературни източници, като 56 са на латиница и 86 на кирилица. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. НОРМАЛНИ И СЛЕДАВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ГЕНЕРИРАЩИ ИЗТОЧНИЦИ

1.1. УСТАНОВЕНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ГЕНЕРИРАЩИ ИЗТОЧНИЦИ

Изборът на метод за изчисляване на режимните параметри при присъединяване на ДЕИ зависи от вида на електрическата мрежа и нейното номинално напрежение. ДЕИ се присъединяват предимно към разпределителната мрежа, която е отворена, разклонена, а в някои случаи едноконтурна. Възможно е големите ветроенергийни комплекси да бъдат присъединени към електрическите мрежи за високо напрежение (ВН), които са многоконтурни.

Традиционен подход за изчисляване на режимните параметри в многоконтурни електрически мрежи е прилагането на метода на възловите напрежения.

Установените режими на ЕЕС при зададени нелинейни източници на ток се описват с нелинейните уравнения на възловите напрежения. Ако всички токове в клоновете на заместващата схема се изразят чрез възловите напрежения и

проводимостите на клоновете, то съгласно първия закон на Кирхоф се получава израза:

$$(1.2) \quad \dot{\mathbf{Y}} \dot{\mathbf{U}} = \sqrt{3} \dot{\mathbf{J}},$$

където $\dot{\mathbf{Y}}$ е матрицата на собствените и взаимните възлови проводимости; $\dot{\mathbf{J}}$ и $\dot{\mathbf{U}}$ - вектор-стълбът съответно на задаващите токове и на неизвестните възлови напрежения.

Нелинейни уравнения на възловите напрежения (1.2) се представят във вид на баланс на токовете и баланс на мощностите, които се решават спрямо неизвестните възловите напрежения $\dot{\mathbf{U}}$.

След определяне на възловите напрежения $\dot{\mathbf{U}}$ на независимите възли се изчисляват режимните параметри в многоконтурната мрежа:

- задаващия ток j_{σ} в базисно-балансиращия възел:

$$j_{\sigma} = \dot{Y}'_{\sigma} \dot{U} + \dot{Y}_{\sigma\sigma} \dot{U}_{\sigma}, \quad \text{където } \dot{Y}'_{\sigma} = [\dot{Y}_{1\sigma} \quad \dots \quad \dot{Y}_{\sigma\sigma}]; \quad \dot{Y}_{\sigma\sigma} = \dot{Y}_{n+1, n+1}.$$

- активната и реактивната мощност $P_{\sigma} + jQ_{\sigma}$, в базисно-балансиращия възел :

$$\dot{S}_{\sigma} = P_{\sigma} + jQ_{\sigma} = \sqrt{3} \dot{U}_{\sigma} \dot{J}_{\sigma}.$$

- токовете \dot{I}_{kj} в клоновете k-j ($j=1, \dots, n+1; j \neq k$) на мрежата:

$$\dot{I}_{kj} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{U}_k - \dot{U}_j) \dot{Y}_{kj}.$$

- мощностите в началото \dot{S}'_{kj} и края \dot{S}''_{kj} на всеки клон k-j:

$$\dot{S}'_{kj} = \sqrt{3} \dot{U}_k \dot{I}_{kj} = \hat{Y}_{kj} \dot{U}_k^2 - \hat{Y}_{kj} \dot{U}_k \dot{U}_j;$$

$$\dot{S}''_{kj} = \sqrt{3} \dot{U}_j \dot{I}_{kj} = \hat{Y}_{kj} \dot{U}_j \dot{U}_k \dot{U}_k^2 - \hat{Y}_{kj} \dot{U}_j^2.$$

- загубите на мощност $\Delta \dot{S}_{kj}$ в клоновете k-j:

$$\Delta \dot{S}_{kj} = \dot{S}'_{kj} - \dot{S}''_{kj} = (\dot{U}_k - \dot{U}_j)^2 \hat{Y}_{kj}.$$

Връзката между напрежението в началото \dot{U}_1 и в края \dot{U}_2 на клон (електропровод или подстанция) се задава чрез надлъжната и напречната съставка на пада на напрежението $\dot{\Delta U} = \Delta U + j\delta U$, определени чрез напрежението U_i и мощността $\dot{S}_i = P_i + jQ_i$ в началото ($i=1$) или в края ($i=2$) на клон с активно (R) и индуктивно (X) съпротивление. При определяне на разпределението на мощностите в клоновете с $U_n \geq 110kV$ се отчитат загубите на мощност $\Delta \dot{S} = \Delta P + j\Delta Q$ и проводимостта $\dot{S}_Y = P_G \pm jQ_B$.

1.2. ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСИМЕТРИЧНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ГЕНЕРИРАЩИ ИЗТОЧНИЦИ

Несиметриите на режима на трифазните системи се характеризират с:

- разлика в големината на амплитудата и/или дефазиранието между напрежението и тока на отделните фази;
- едновременна разлика на амплитудите и дефазиранията между напрежението и тока на фазите.

Несиметрията на напрежението на изводите на генериращите източници при установени режими в ЕЕС и равномерно разпределен товар между фазите е незначителна. При внедряването на голям брой ДЕИ в разпределителните мрежи е възможно възникването на повреда в самия генериращ източник да се създаде несиметрия на напрежението на неговите изводи.

Неравенство на импедансите и проводимостите на отделните фази се отнася предимно за електропроводите.

Неравномерното натоварване на фазите възниква от еднофазните потребители, присъединени към различни фази на мрежата за НН.

Несиметричните режими са от особено значение, когато предизвикват изменение на някои режимни параметри или излизане извън нормираните стойности на някои от показателите за качество на електроенергията. Неблагоприятното влияние на несиметрията в електрическата мрежа се свежда до наслагване на токовете с обратна и нулева последователност, към тока с права последователност, което води до увеличаване на сумарните токове в отделните фазни елементи на мрежата, намаляване на допустимия за тях ток на права последователност по условието за нагриване, а следователно до понижаване на тяхната пропускателна способност.

Изчисляването на несиметричните режими се извършва със системата на фазните или тази на симетричните координати. При възникването на несиметрия от параметрите на заместващата схема (импеданса на клоновете) или от режима (фазните токове и напрежения) се определят режимните параметри и коефициентите на несиметрия и на неуравновесеност на напрежението и тока.

1.3. РЕЖИМНИ ПАРАМЕТРИ ПРИ НЕПЪЛНОФАЗНИ РЕЖИМИ

Непълнофазните режими на работа в мрежата настъпват при трайна повреда на една от фазите, която се изключва и ремонтира, а потребителят се захранва с останалите две фази. Изключването на една или две от фазите на елемент от трифазна мрежа предизвиква несиметрия на режима. В изчислителните процедури се приема, че всички елементи на трифазната система притежават еднакви параметри на фазите.

1.4. ОСНОВНИ НАСОКИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НОРМАЛНИТЕ И СЛЕДАВАРИЙНИТЕ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ГЕНЕРИРАЩИ ИЗТОЧНИЦИ

Търсенето на оптимални способи за подобряване на качеството на електрическата енергия в електрическите мрежи с ДЕИ и несиметрични товари е една от основните насоки за изследвания. Несиметрията на напрежението в трифазните мрежи, което води до допълнителни отклонения на напрежението на клемите на потребителите, увеличаване на загубите на мощност, влошаване на условията на работа на електрическите съоръжения и др.

В електрически мрежи за НН, несиметрията на напрежението е съществена, поради наличието на голям брой еднофазни потребители. Увеличаването на броя и мощността на еднофазни електрически товари, както и повишаването на изискванията за качеството на електроенергията, изискват разработването и изследването на високоефективни методи и технически средства за балансиране на токове и напрежения. В разпределителните мрежи НН, поради наличието на еднофазно натоварване, винаги има значителна несиметрия на токовете и напреженията. Следователно несиметричният режим в реални експлоатационни условия е обичаен в електрически мрежи за НН. Допълнителните загуби в разпределителни мрежи за НН само поради неравномерното натоварване на фазите достигат до 4% от цялото потребление на електроенергия.

Основните насоки за изследване в научните трудове по темата са свързани с: определяне на сумарните загуби на мощност, свързани с несиметричните режими в разпределителните електрически мрежи; разработване на мероприятия за понижаване на несиметрията; икономически и надеждностни показатели при несиметрични режими; съвременни методи за изследване на несиметричните режими; анализ на непълнофазните режими; откриване на нестабилност на напрежението при голямо смущение; защита от аномални режими; интелигентни технологии за управление на мрежата; управление на режимите в хибридни системи и др.

Въз основа на проучените литературни източници са обосновани нерешените проблеми по темата и са набелязани основните задачи за решаване.

Глава 2. ПРОПУСКАТЕЛНА СПОСОБНОСТ В НОРМАЛНИ И СЛЕДАВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ИЗТОЧНИЦИ

2.1. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОПУСКАТЕЛНАТА СПОСОБНОСТ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ

Проверката на пропускателна способност има за цел да установи дали преносната възможност на електропроводите няма да бъде превишена за периодите на функциониране на ДЕИ, а също при различни хипотези за изменение на товарите. Освен това, след аварийни изключения в електрическата мрежа се променя нейната конфигурация и е възможно в някои случаи пропускателната способност на участъци от електропроводите да не е достатъчна в утежнените експлоатационни условия.

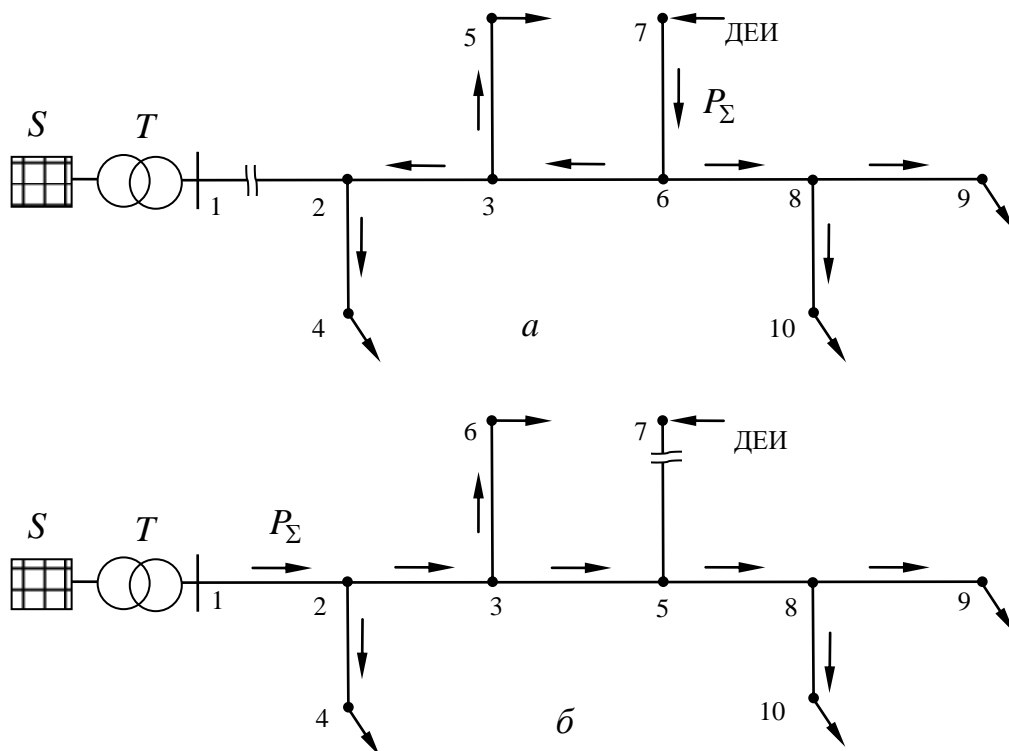
Целта е да се създаде методика и алгоритъм за определяне на пропускателната способност в нормален и следаварийен режим в разпределителни мрежи с ДЕИ.

2.1.1. Проверка на пропускателната способност на електропроводите в нормален режим

Пропускателната способност се характеризира с граничната мощност, която може да се пренесе в електрическата мрежа, ограничавана от устойчивостта на паралелната работа на генериращите източници или възлите на товарите и допустими токове по нагряване. Граничната предавана мощност в мрежи за високо напрежение (ВН) е свръхвисоко напрежение (СВН) се определя по условието за устойчивост, а в разпределителни мрежи СН и НН - по условието за допустимо нагряване.

2.1.2. Проверка на пропускателната способност на електропроводите в следаварийен режим в отворена разклонена мрежа

Изчислителните следаварийни режими в отворена разклонена мрежа с два захранващи възела са дадени в табл.2.1, а разпределението на мощностите при тях – на фиг.2.2.



Фиг.2.2. Разпределение на мощностите в следаварийен режим при прекъсване на: а - връзката на клона със захранващия възел от електроенергийната система; б - присъединителния клон на ДЕИ

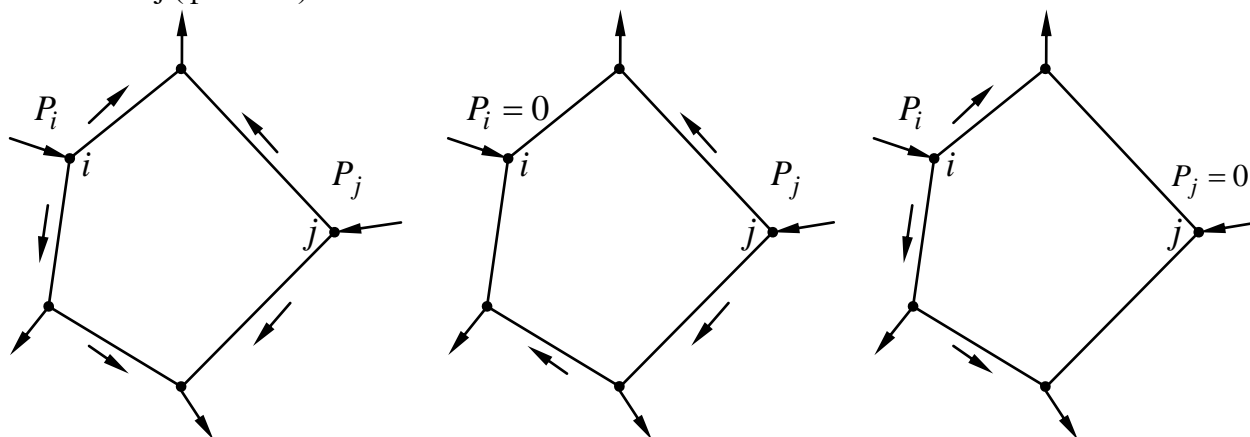
Таблица 2.1. Максимална сумарна мощност в следавариен режим при отворени разклонени мрежи

Следавариен режим	Максимална сумарна мощност P_{Σ} в участък
Прекъсване на връзката на клона със захранващия възел	6 - 7
Прекъсване на присъединителния клон на ДЕИ	1 - 2

2.1.3. Проверка на пропускателната способност на електропроводите в следавариен режим в едноконтурна мрежа

За проверката на пропускателната способност на електропроводите в следавариен режим в едноконтурна мрежа се разглеждат следните варианти с :

- последователно прекъсване на участъците на електрическата мрежа при наличие на захранване във възли i и j (фиг.2.3а);
- последователно прекъсване на участъците при липса на захранване от възел i (фиг.2.3б);
- последователно прекъсване на участъците при липса на захранване от възел j (фиг.2.3в).



Фиг.2.3. Разпределение на активните мощности: а – в нормален режим при работа на два генериращи възли i и j ; б - при изключване на генериращия източник във възел i ; в – при изключване на ДЕИ във възел j

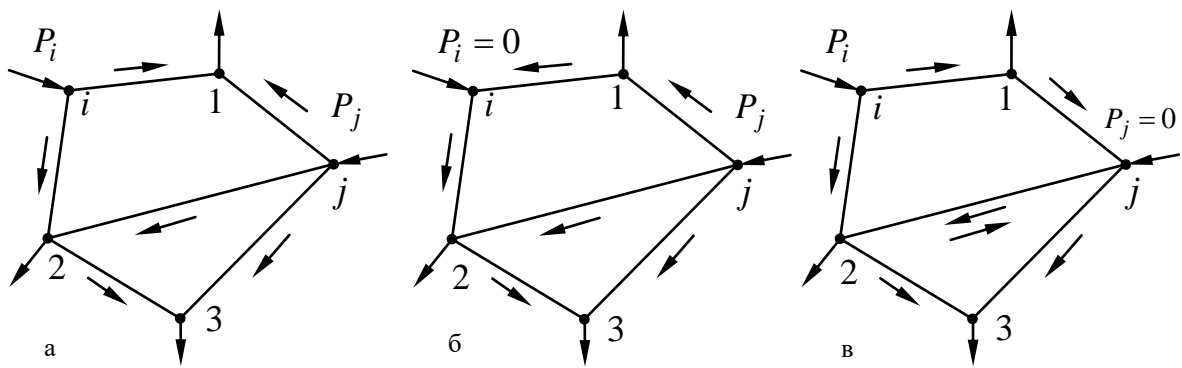
2.1.4. Проверка на пропускателната способност на електропроводите в следавариен режим в многоконтурна мрежа

За проверката на пропускателната способност на мрежата в следавариен режим в многоконтурна мрежа се разглеждат следните варианти с :

- последователно прекъсване на участъците при наличие на захранване във възли i и j (фиг.2.4а);
- последователно прекъсване на участъците при липса на захранване от възел i (фиг.2.4б) и при липса на захранване от възел j (фиг.2.4в).

От разглежданите варианти на следаварийните режими поради промяна на конфигурацията на електрическата мрежа се намира разпределението на мощностите и се определя режимът, при който протича най-голямата мощност в съответния участък.

При известно разпределение на мощностите се намират токовете в клоновете и се сравняват с допустимите, с което се проверява условието за пропускателна способност в разпределителни мрежи. Изчисленията на пропускателната способност за електрическа мрежа с голям брой клонове и възли не е трудно при наличието на съвременните изчислителни средства, но по-съществен е въпроса за изброяването на следаварийните състояния, за които трябва да се проведат изчисленията.



Фиг.2.4. Разпределение на активните мощности: а – в нормален режим при работа на два генериращи възли i и j ; б - при изключване на генерацията източник във възел i ; в – при изключване на ДЕИ във възел j

Обобщение:

- Посоката на мощностите в клоновете при включване на ДЕИ към електрическата мрежа, зависи от големините на присъединяваните мощности и товарите, местоположението на възлите спрямо подстанцията.
- Разпределението на мощностите в клоновете на електрическата мрежа трябва да се познава при различни режими на натоварване на ДЕИ, което се отчита чрез въвеждането на коефициента k_{P_i} . Така се взема предвид, че реактивната мощност на шините с генераторно напрежение $(Q_{Gj})_i$ и реактивна мощност $(Q_{Bj})_i$, необходима за компенсация на реактивните товари, не са еднакви в различните режими.
- Постъпващата мощност от ДЕИ в присъединителния възел е $k_{P_i} P_{Gj} + j(Q_{Gj} - Q_{Bj})_i$, което трябва да се отчита при симулиране на режимите на електрическата мрежа с ДЕИ.
- За проверката на пропускателната способност на мрежата в следаварийен режим в различните конфигурации на електрическите мрежи е необходимо да се разглеждат варианти с последователно прекъсване на участъците при наличие на захранване от захранващите възли, липса на захранване от захранващата подстанция и при изключване на ДЕИ.

2.2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРОПУСКАТЕЛНА СПОСОБНОСТ В СЛЕДАВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ИЗТОЧНИЦИ

За определяне на пропускателната способност на електрическите мрежа се използва граничната стойност на пренасяната мощност, която се ограничава от следните основни фактори: устойчивост на паралелната работа на генериращите източници или възли на товара; допустими токове по нагряване и допустима загуба на напрежение.

Целта е да се разработи методика и алгоритъм за определяне на пропускателната способност на клоновете в електрическите мрежи с присъединени ДЕИ, адаптирани за провеждане на изчисления към симулатора на режимите в разпределителните мрежи.

2.2.1. Методика за проверка на пропускателната способност на електропроводите

Методиката включва следните стъпки:

- **Стъпка 1.** Въвеждане на данни за номиналното напрежение. При номинално напрежение над 110 kV граничната стойност на пренасяната мощност се

определя по условието за устойчивост с модул YST, а в разпределителните мрежи СН и НН – по допустимо нагряване и допустима загуба на напрежение с модул PSNN. С логически блок се преминава към изпълнение на един от двата модула. Описанието на допълнително разработените модули към симулатора на режимите в разпределителните мрежи е представено в Приложение 2.

- **Стъпка 2.** Определяне на пределната пренасяна мощност при електропроводи за СВН и на разпределението на мощностите по клоновете в разпределителните мрежи за СН и НН.

Модул YST:

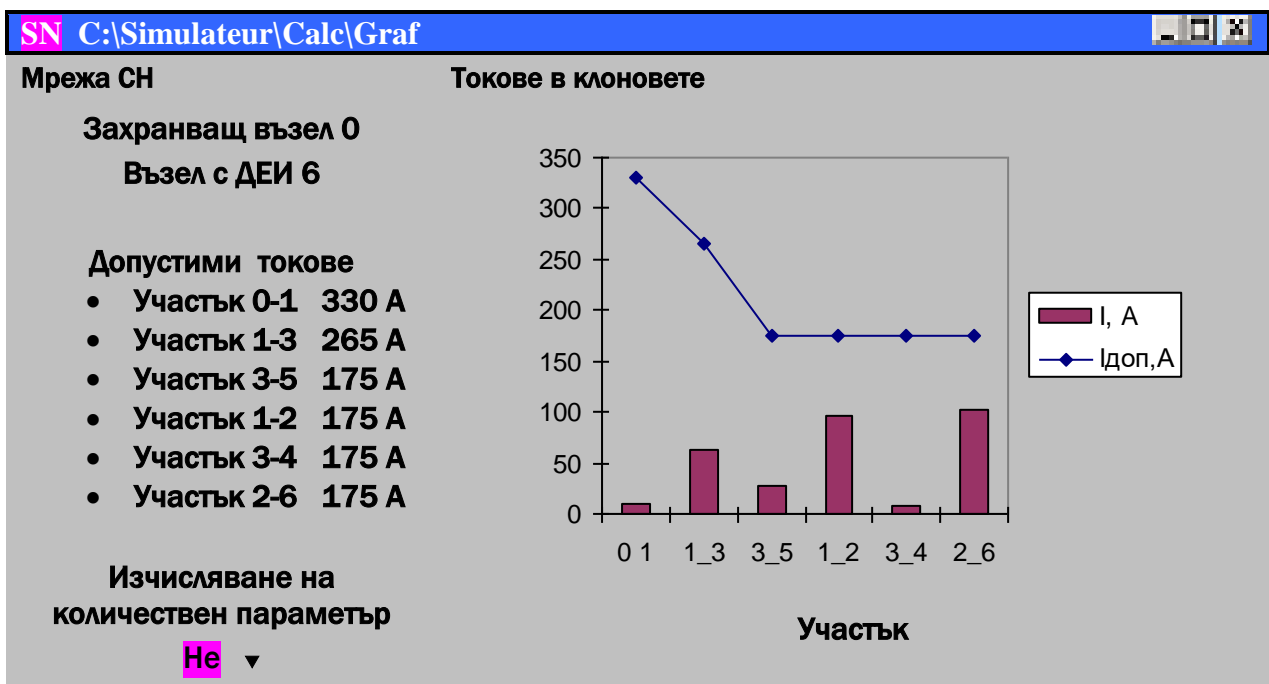
Дефазирането δ между напреженията в началото $U_1=U_1/\varphi_1$ и края $U_2=U_2/\varphi_2$ на електропроводите за СВН е от значение за статичната устойчивост на ЕЕС. По тази причина се изследва и определя граничната стойност на дефазирането δ на електропровода за СВН. За да се подобри статичната устойчивост е необходимо да се намали пренасяната активна мощност или да се повиши напрежението U_1 (U_2). С цел подобряване на статичната устойчивост на електропреносната връзка може да се променя ъгъл δ чрез изменение на реактивната мощност Q_2 .

Когато се достигне пределният ъгъл $\delta_{пр}$ при дадени P_2 , U_2 и P_1 за подобряване на статичната устойчивост на ЕЕС е необходимо при индуктивен товар ($+jQ_2$) да се увеличи реактивната мощност Q_2 , а при капацитивен товар ($-jQ_2$) - да се намали.

Модул PSNN:

След намиране на разпределението на мощностите и се намират съответните токовете I_{kj} в клоновете на разпределителната мрежа се прави проверка на условието за пропускателна способност: $I_{kj} \leq I_{max}$, където I_{max} е максималният ток.

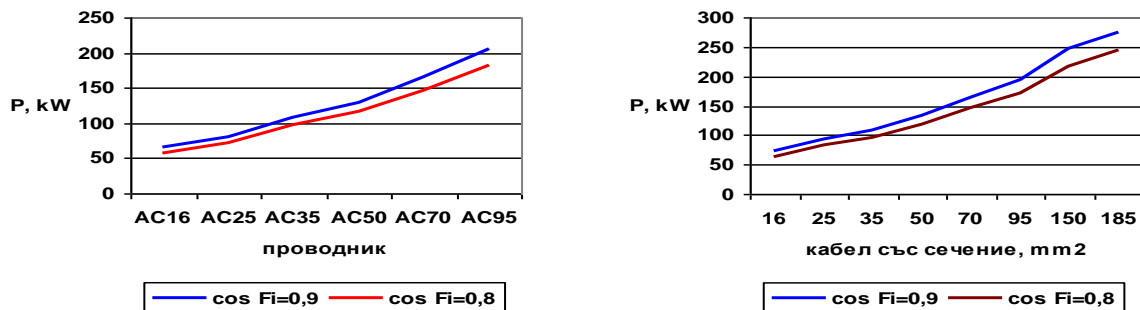
Изчислените токове в клоновете се сравняват с допустимите стойности за съответния тип проводник, кабел или изолиран проводник (заложен алгоритмично в модул CATALOG). Така се изпълнява проверката по критерия за допустимо нагряване в нормален или следавариен режим, представена на фиг.2.5.



Фиг.2.5. Токове в клоновете на разпределителната мрежа

2.2.2. Изследване на пропускателната способност на клонове в мрежа за НН с ДЕИ

Проверката на избраните клонове от мрежи НН с ДЕИ цели да даде отговор на въпроса до каква степен е възможно изграждането на ДЕИ без да се наруши условието за пропускателна способност. Границите на пренасяните мощности в разпределителни мрежи НН в зависимост от използвания вид проводник или кабел са дадени на фиг.2.6.



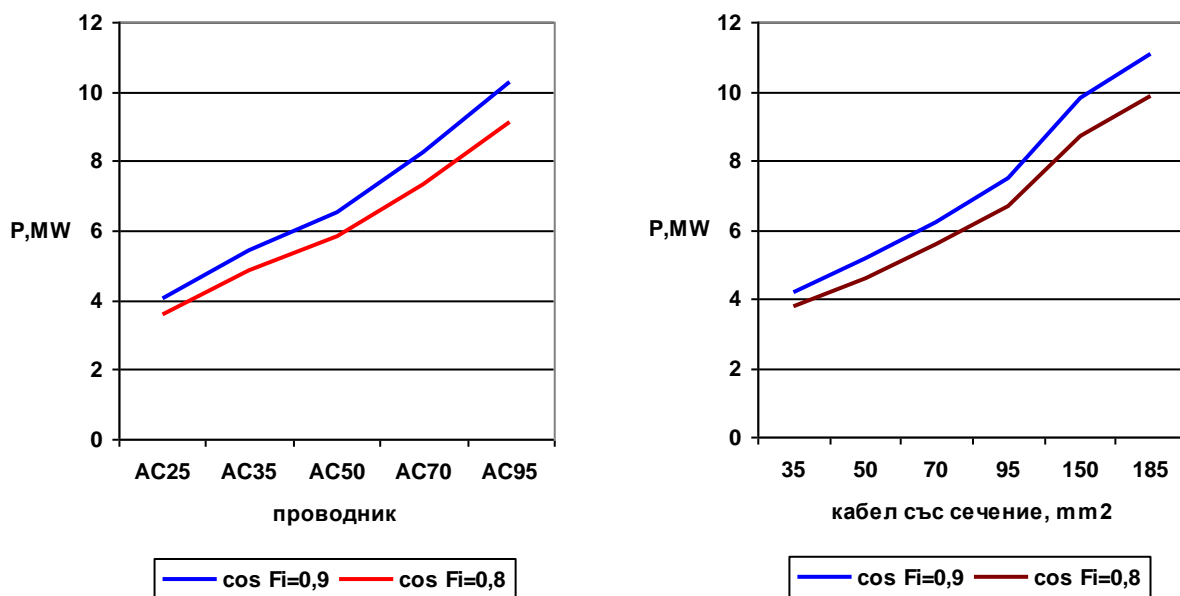
Фиг.2.6. Граници на пренасяните мощности в разпределителни мрежи НН по условие за допустимо нагряване в нормален режим за: а – проводници; б - кабели

Внасяните мощности от ДЕИ в мрежи НН с въздушни електропроводи не трябва да надвишават 100 и 200 kW при $\cos \varphi = 0,9$ в участъци, изградени съответно с проводник AC35 и AC95, а при кабелни линии – до 110 и 275 kW при $\cos \varphi = 0,9$ при кабели със сечения съответно 35 и 185 mm².

Условието за допустимо нагряване на проводниците в нормален режим се спазва още в етапа проектиране. При експлоатация на ДЕИ е необходимо да не се допуска влошаване на фактора на мощността в присъединителния клон.

2.2.3. Изследване на пропускателната способност на клоновете в мрежа СН с ДЕИ

Границите на пренасяните мощности в разпределителни мрежи СН в зависимост от използвания вид проводник или кабел са дадени на фиг.2.7.



Фиг.2.7. Граници на пренасяните мощности в разпределителни мрежи НН по условие за допустимо нагряване в нормален режим за: а – проводници; б – кабели с медни жила

От проведените изчисления се установява, че ограниченията за присъединяваната мощност по пропускателна способност на електропроводите за СН са както следва:

- до 10,5 MW при използване на въздушни линии;
- до 12,25 MW и 9,5 MW при кабели съответно с медни и алуминиеви тоководещи жила.

Условието за допустимо нагряване на проводниците и кабелите в нормален режим се спазва още в етапа проектиране на електропроводите.

При експлоатация на ДЕИ е необходимо да не се допуска влошаване на фактора на мощността в присъединителния клон.

Обобщение:

- Присъединяваните мощности от ДЕИ в мрежи за НН, изградени с въздушни линии, не трябва да надвишават 100 и 200 kW при $\cos \varphi=0,9$ в участъци, изпълнени съответно с проводник АС35 и АС95, а при кабелни линии – до 110 и 275 kW при $\cos \varphi=0,9$ при кабели със сечения съответно 35 mm² и 185 mm².
- Присъединяваната мощност по пропускателна способност на електропроводните линии за СН се ограничава както следва:
 - до 10,5 MW при въздушни електропроводи;
 - до 12,25 MW и 9,5 MW при кабели съответно с медни и алуминиеви тоководещи жила.
- Тъй като условието за допустимо нагряване на проводниците и кабелите в нормален режим се спазва още в етапа проектиране, то при експлоатация на ДЕИ е необходимо да не се допуска влошаване на фактора на мощността в присъединителния клон.

2.3. ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА ВТОРА

- Разпределението на мощностите в клоновете на електрическата мрежа трябва да се познава при различни режими на натоварване на ДЕИ. Реактивната мощност на шините с генераторно напрежение и реактивна мощност, необходима за компенсация на реактивните товари, не са еднакви в различните режими.
- За проверката на пропускателната способност на мрежата в следавариен режим в различните конфигурации на електрическите мрежи е необходимо да се разглеждат варианти с последователно прекъсване на участъците при наличие на захранване от захранващите възли, липса на захранване от захранващата ПС и при изключване на ДЕИ.
- Създадената методика и софтуер позволяват да се определят стойностите на присъединяваните мощности от ДЕИ по условието за пропускателна способност в мрежи за НН и за СН, изградени с въздушни и кабелни линии, при зададени типове и сечения на проводниците или на тоководещите жила на кабелите и съответни стойности на фактора на мощността $\cos \varphi$.

Глава 3. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСИМЕТРИЯТА В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗИРАНИ ГЕНЕРИРАЩИ ИЗТОЧНИЦИ

3.1. СЛЕДЕНЕ НА РЕЖИМНИТЕ ПАРАМЕТРИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ

Състоянието на режимните параметри в разпределителните мрежи не се следи в реално време. В сравнение със захранващата мрежа, разпределителната мрежа е с много ниска наблюдаемост и с по-малко източници на реактивна мощност. Наблюдението и анализът на режимните параметри се извършва чрез тяхното регистриране за определен период от време. За целите на локалното управление, на базата на предварителни изчисления на режимите и събраните данни, се обосновават оптималните настройки за регулиране на напрежението. При традиционния подход се

използват предимно измененията на коефициентите на трансформация на силовите трансформатори и включване на компенсирани устройства.

Насищането на разпределителните мрежи с ДЕИ налага следене на режимните параметри и търсене на възможности за тяхното подържане в допустимите граници.

На базата на следената информация за пълната, активната и реактивната енергия, минималната, максималната и средната стойност на токовете на фазите, фазните и междуфазните напрежения и допустимите граници за техните изменения се вземат решения за необходимостта от управление на режимите в разпределителните мрежи.

Децентрализираното управление на режимите в разпределителните мрежи трябва да се извършва в следните етапи:

- натрупване на база данни за текущите режимни параметри и ползване на технически средства за тяхното следене.
- разработване на локални устройства за регулиране на напрежението с максимално използване на създадената база данни.
- координиране на работата на съседните локални регулатори на напрежението в разпределителните мрежи.

Обобщение:

- Съвременните системи позволяват следенето на режимните параметри в разпределителните мрежи, което позволява регулиране на напрежението и управление на режимите.
- Насищането на разпределителните мрежи с ДЕИ създава някои технически проблеми, които са свързани с необходимост от контрол при нормални и аварийни условия. Тези проблеми могат да се решат с регулиране и автоматичното управление на режимните параметри, базирано на натрупване на база данни от тяхното следене в нормални експлоатационни условия.
- Локалното регулиране на напрежението е ефективно мероприятие за постигане на ефективно управление на режимите в разпределителните мрежи.

3.2. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСИМЕТРИЯТА В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ

Методиката за изчисляване на експлоатационните несиметрични режими се основава на заменянето на всички източници на несиметрия, съдържащи се в мрежата, с еквивалентни източници на е.д.н., в съответствие с принципа за компенсация, което позволява многофазната система да се разглежда като симетрична.

При прилагане на метода на симетричните съставки изходната схема на разпределителната мрежа се представя с независими една от друга заместващи схеми с права, обратна и нулева последователност. Изчисляването на несиметричната многофазна система се свежда до формиране на математично описание на режима във вид на система уравнения, съставени по законите на Ом и Кирхоф в съответствие със заместващите схеми и изхождайки от схемите и конкретните гранични условия за всеки случай и решаването на дадена система уравнения с предложени изборен метод спрямо неизвестните симетрични съставки на токовете и напреженията.

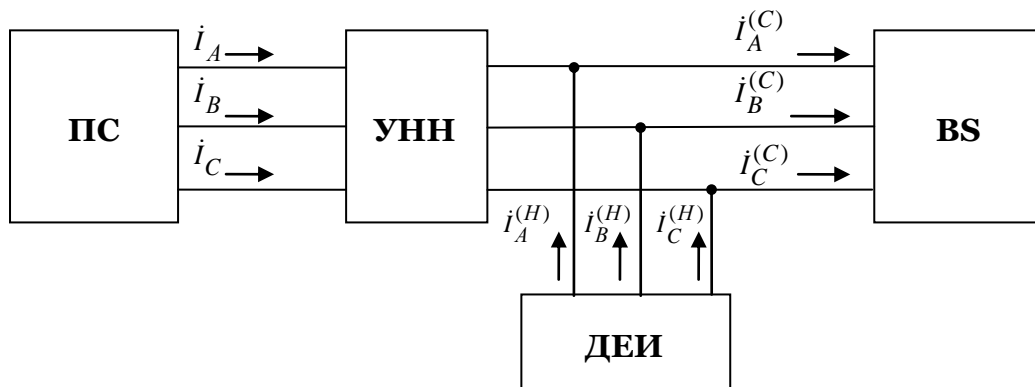
Удобството на посочения метод се изразява във възможността да се използва за анализ на електрически разпределителни мрежи с надлъжни и напречни несиметрии, каквито се формират (вносят) от компенсирани устройства (КУ).

Основните уравнения за описване на обобщена трифазна система, съдържаща надлъжни и напречни елементи се записват за случай на симетричен товар и несиметрия, внасяна от ДЕИ (фиг.3.16а) и несиметрия от товара при симетричен режим от ДЕИ (фиг.3.16б).

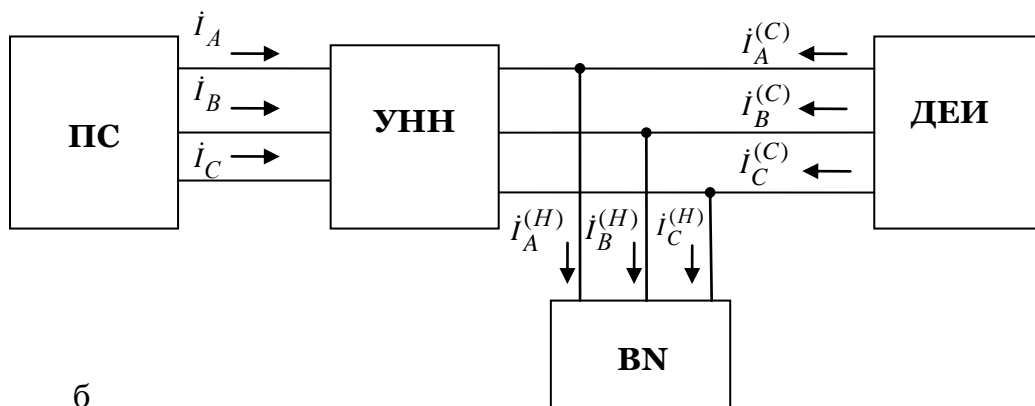
Методиката за схемата фиг.3.16 от [Нед-1-18] се допълва с възможността за провеждане на анализ на несиметрии от товара или от ДЕИ за електрически мрежи с различна конфигурация: едноконтурни и многоконтурни.

В алгоритъма се включва съставянето на едноконтурната мрежа, като в схемата се променя мястото на ДЕИ или на товарите (симетричен и несиметричен).

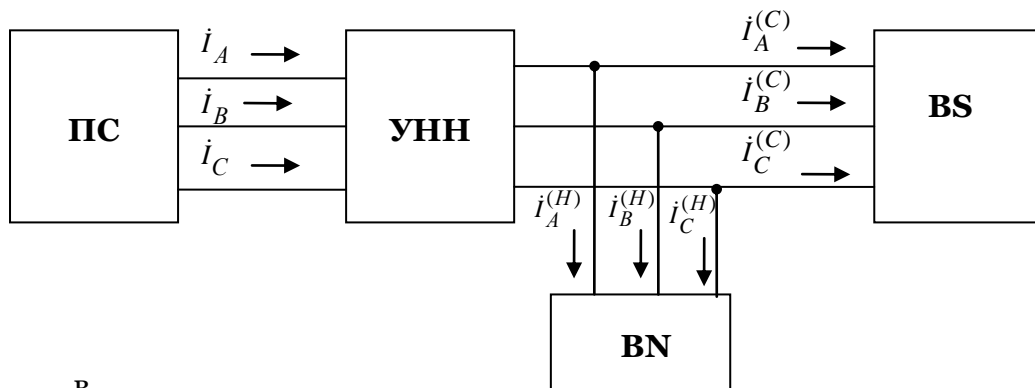
На фиг. 3.16. е представена обобщена трифазна система с надлъжни и напречни елементи, където са приети следните означения: ПС – захранваща подстанция; УНН – участък с надлъжна несиметрия; BS – симетричен товар; BN – несиметричен товар; ДЕИ – децентрализиран енергиен източник



а

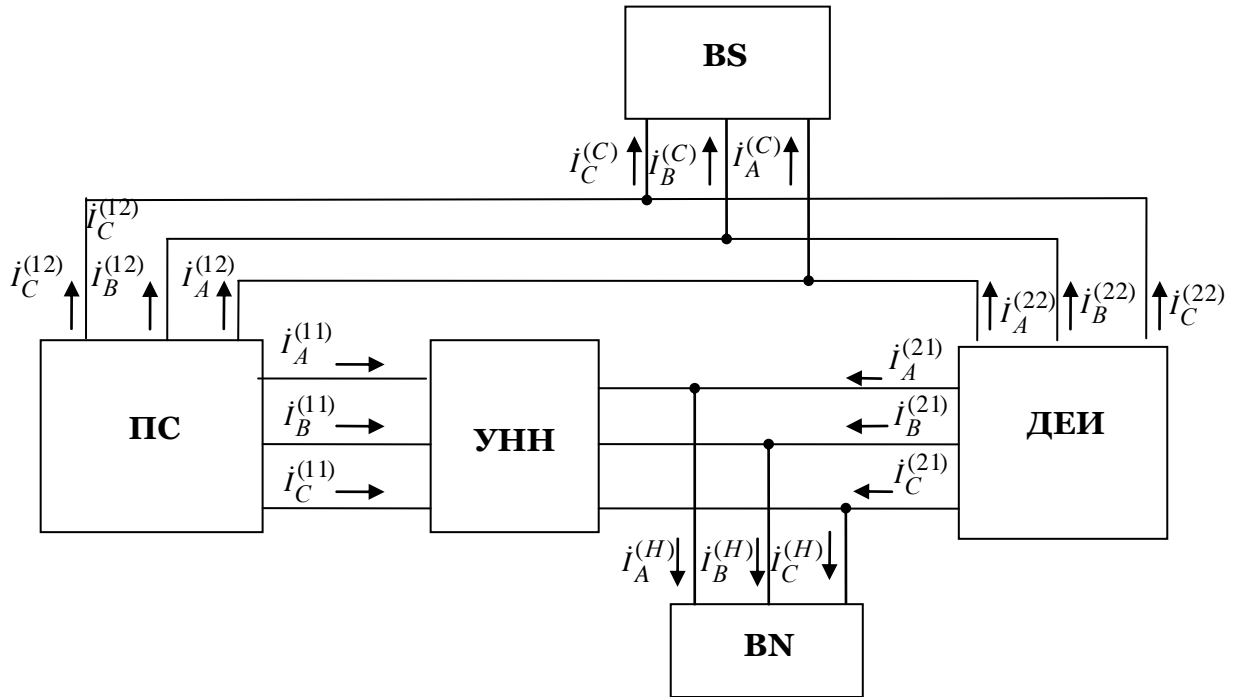


б



в

Фиг.3.16. Обобщена трифазна система с надлъжни и напречни елементи



Фиг.3.17. Едноконтурна трифазна система с надлъжни и напречни елементи: ПС – захранваща подстанция; УНН – участък с надлъжна несиметрия; BS – симетричен товар; BN – несиметричен товар; ДЕИ – децентрализиран енергиен източник

За фазните токове за схемата от фиг.3.17 се записва:

$$(3.1) \quad i_A^{(C)} = i_A^{(12)} + i_A^{(22)}; \quad i_B^{(C)} = i_B^{(12)} + i_B^{(22)}; \quad i_C^{(C)} = i_C^{(12)} + i_C^{(22)};$$

$$(3.2) \quad i_A^{(H)} = i_A^{(11)} + i_A^{(21)}; \quad i_B^{(H)} = i_B^{(11)} + i_B^{(21)}; \quad i_C^{(H)} = i_C^{(11)} + i_C^{(21)}.$$

Въз основа на принципа на компенсация се заменят несиметричните елементи с еквивалентни източници на е.д.н., а получената електрическа верига се представя със заместващи схеми с права, обратна и нулева последователност.

Фазните напрежения на симетричния и несиметричния товар имат еднакви съставящи с права и обратна последователност, а се отличават само съставките с нулева последователност. Съставките на токовете с нулева последователност са различни от нула, ако има път за тяхното протичане поне между два от звездните центрове на захранващия източник, симетричния и несиметричния товар.

Основните уравнения за описване на система с надлъжни и напречни елементи, се записват за заместващите схеми:

- с права последователност:

$$(3.3) \quad i_1 \dot{Z}_1 + \Delta \dot{U}_1 + \dot{U}_1 = \dot{E}_1; \quad i_1 = i_1^{(H)} + i_1^{(C)}; \quad \dot{U}_1 = i_1^{(C)} \dot{Z}_1^{(C)};$$

- с обратна последователност:

$$(3.4) \quad i_2 \dot{Z}_2 + \Delta \dot{U}_2 + \dot{U}_2 = 0; \quad i_2 = i_2^{(H)} + i_2^{(C)}; \quad \dot{U}_2 = i_2^{(C)} \dot{Z}_2^{(C)};$$

- с нулева последователност:

$$(3.5) \quad i_0 (\dot{Z}_0 + 3Z_N) + \Delta \dot{U}_0 + \dot{U}_0^{(H)} + 3i_0^{(H)} \dot{Z}_N^{(H)} = 0; \quad i_0 = i_0^{(H)} + i_0^{(C)}; \quad \dot{U}_0^{(H)} + 3i_0^{(H)} \dot{Z}_N^{(H)} = i_0^{(C)} (\dot{Z}_0^{(C)} + 3\dot{Z}_N^{(C)}),$$

където $\dot{E} = \dot{E}_1$ е 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; $i_i^{(C)}$, ($i=A,B,C$) - фазните токове на симетричния товар; $i_s^{(C)}$, ($s=1,2,0$) - съставките с права, обратна и нулева последователност на токовете в надлъжния участък на мрежата; $i_s^{(H)}$, ($s=1,2,0$) - съставките с права, обратна и нулева последователност на токовете на несиметричния товар; $i_i^{(H)}$, ($i=A,B,C$) - фазните токове на несиметричния товар; $\dot{Z}_N^{(C)}$ и $\dot{Z}_N^{(H)}$ - съпротивлението на звездния център съответно при симетричен и несиметричен товар.

За определяне на режима на електрическа мрежа, съдържаща несиметрии, основните уравнения, получени от заместващите схеми с различни последователности, е необходимо да се допълнят с уравнения, съставени като се изхожда от схемите и параметрите на несиметричните елементи.

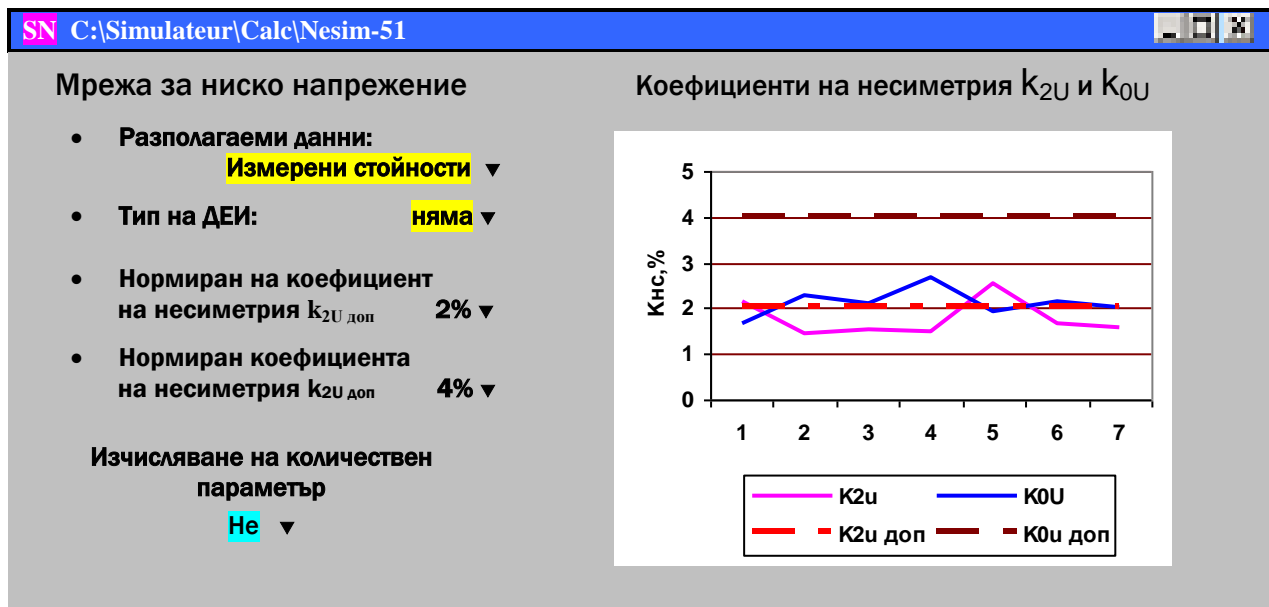
Изследване на несиметрията в мрежа за НН

За дадена електрическа мрежа се провеждат изчисления на несиметрията на напреженията за трифазна мрежа при неравномерно разпределение на товарите по фазите.

Определят се показателите, които характеризират несиметрията на напреженията:

- коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност (k_{2U});
- коефициента на несиметрия на напрежението по нулева последователност (k_{0U}).

Нормираните допустими стойности на коефициентите на несиметрия по напрежение по обратна k_{2U} и нулева k_{0U} последователност са съответно 2 % и 4 %.

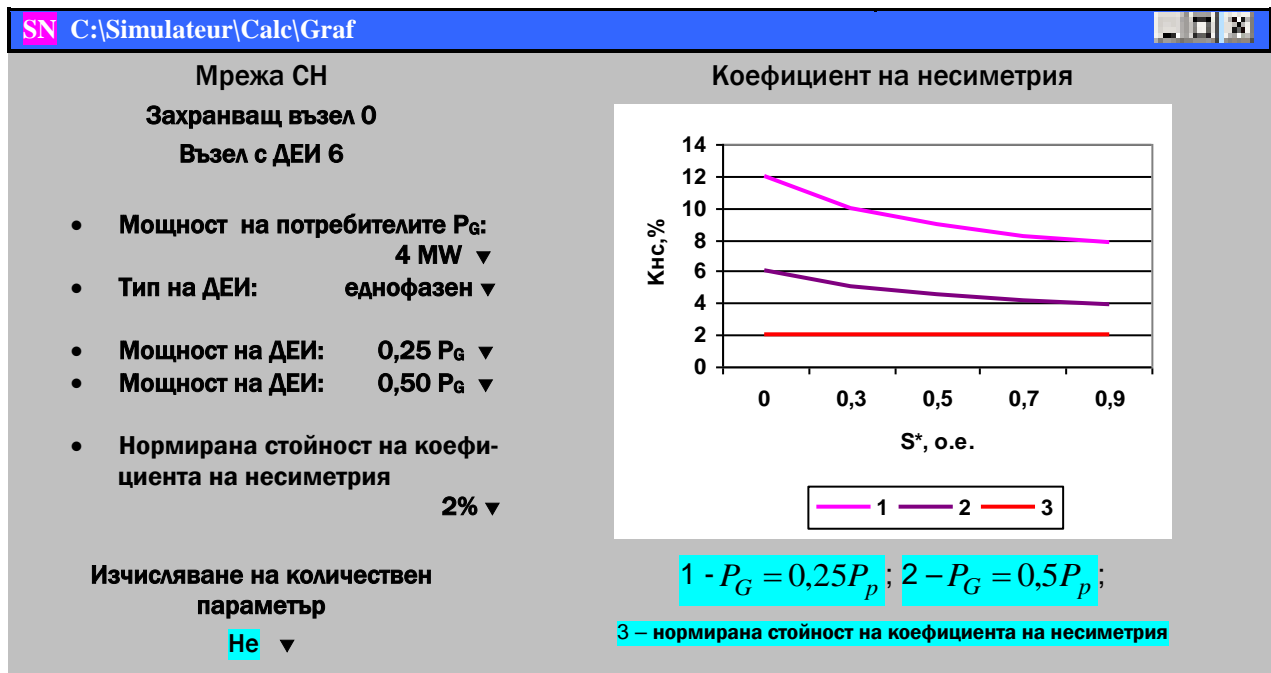


Фиг.3.21. Коефициенти на несиметрия на напрежението по обратна k_{2U} и нулева k_{0U} последователност

Резултатите за коефициентите на несиметрия по напрежение по обратна k_{2U} и нулева k_{0U} последователност за 7 последователни измервания на линейните U_{AB} , U_{AC} , U_{BC} и фазните напрежения U_A , U_B , U_C . Само за две от изчислените стойности на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна k_{2U} последователност се наблюдава превишаване на нормираните стойности (фиг.3.21). Когато в практиката се наблюдават случаи на превишаване на нормираните стойности на коефициентите за несиметрия, се налага да се прилагат мероприятия за симетриране на режима.

Изследване на несиметрията в мрежа за СН с присъединени ДЕИ

Разглежда се несиметрия от еднофазен ДЕИ, присъединен към трифазна система. Резултатите са представени на фиг. 3.22.



Фиг.3.22. Зависимост на коефициента на несиметрия от големината еднофазен ДЕИ с мощност: 1 - $P_G = 0,25P_p$; 2 - $P_G = 0,5P_p$; 3 - нормирана стойност на коефициента на несиметрия

От изложеното може да се направят следните изводи:

- Математичният модел позволява да се изчислят непълнофазните режими на електрическите мрежи при различно съчетание на големините на мощностите на ДЕИ и потребителите.
- Анализът на резултатите от изчисленията показва случаите, когато несиметрия на напрежението е недопустима и е необходимо симетриране на режима.
- Големината на коефициента на несиметрия на напрежението в значителна степен зависи от типа на несиметрията, дължината на линията, съотношението на мощностите на ДЕИ и товара.

3.3. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСИМЕТРИЯТА В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ ЗА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ

Целта на изследването е да се състави методика и алгоритми по разработен математичен модел и да се проведе анализ на режимните параметри в четирипроводна линия за НН при несиметрични режими.

Методика за изследване на несиметрията в разпределителни мрежи за НН в зависимост от групата на свързване на силовите трансформатори

Адаптацията на методиката за анализ на несиметриите в разпределителните мрежи за НН при несиметричен товар изисква отчитането на вида на захранващите трансформатори. Това са най-често двунамотъчни силови трансформатори (СТ), предимно с група на свързване на намотките звезда-звезда с изведен звезден център (Y/Y₀). Техният основен недостатък е голямото им съпротивление на нулева последователност, което се определя от конструктивните особености, схемата на свързване на намотките, степента на насищане на магнитопровода и др.

Тези трансформатори имат съпротивление на нулева последователност, значително по-голямо от съпротивлението на късо съединение. Тази особеност на СТ с намотки, свързани в Y/Y₀, ги прави особено чувствителни към фазните токове в мрежи

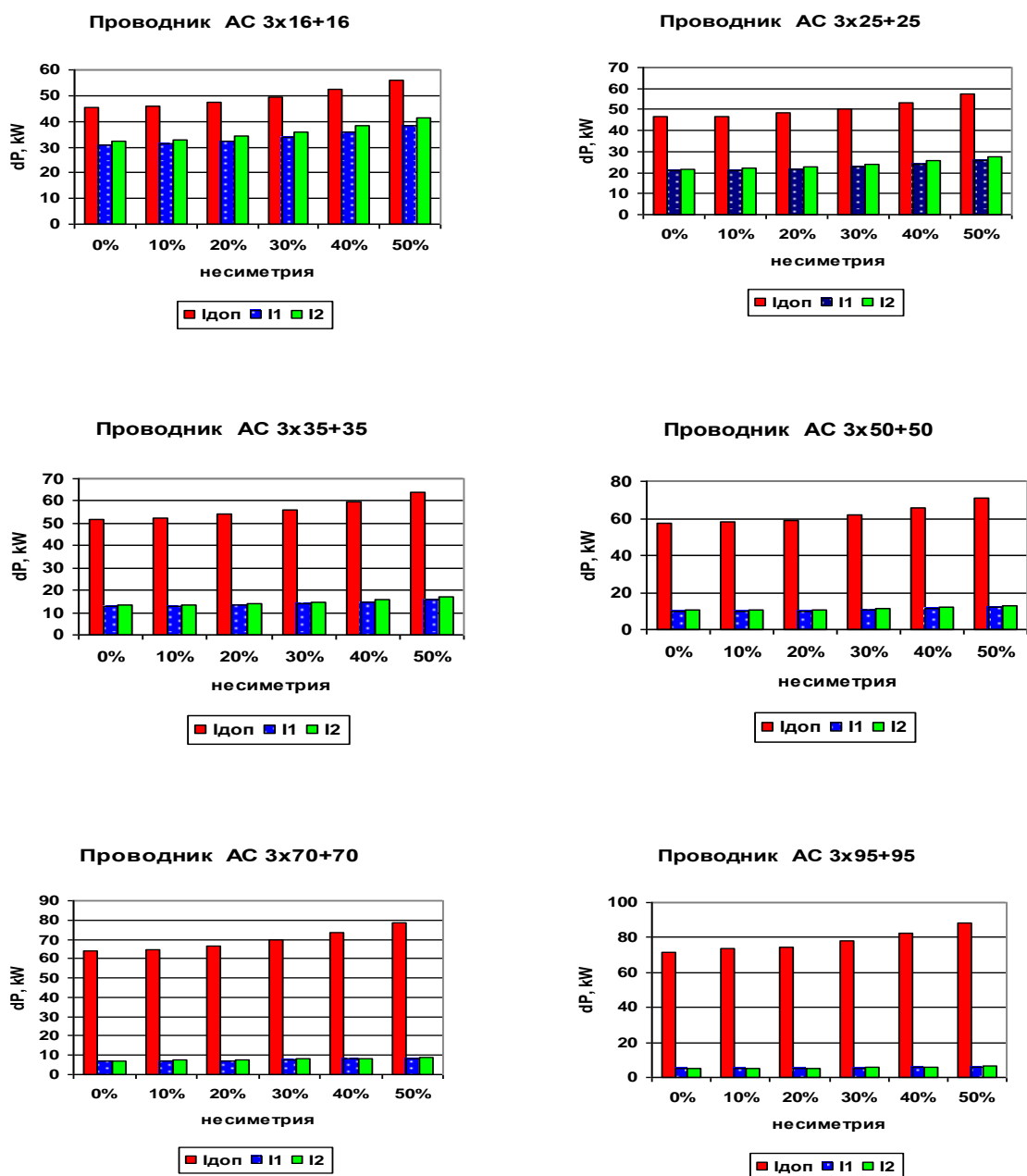
за НН с несиметричен товар. Двухмотъчни СТ с група на свързване на намотките звезда-зигзаг с изведен звезден център (Y/Z₀) понасят по-голям несиметричен товар. Съставени са следните алгоритми:

- Алгоритъм 1 - Режим на работа на СТ с група на свързване на намотките Y/Y₀;
- Алгоритъм 2 - Режим на работа на СТ с група на свързване на намотките Y/Z₀.

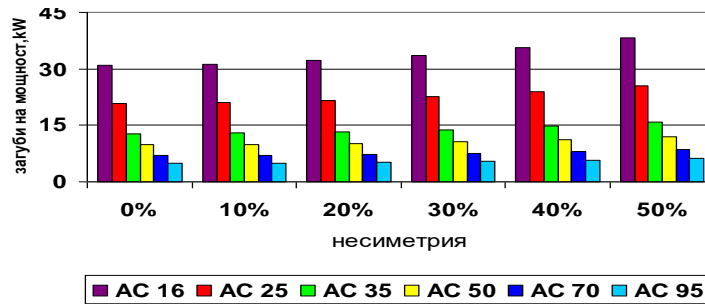
Експериментално изследване

Изчисленията са проведени със специално разработени модули за пресмятане на несиметрични режими с уравненията по съставената методика, включени в симулатора за електрически изчисления в разпределителните мрежи. Получават се токовете, напреженията и загубите на мощност в трите фази при различна степен на несиметрия на режима (варираща от 0 до 50%), а също коефициентите на несиметрия на напрежението и тока, които се сравняват с нормираните стойности.

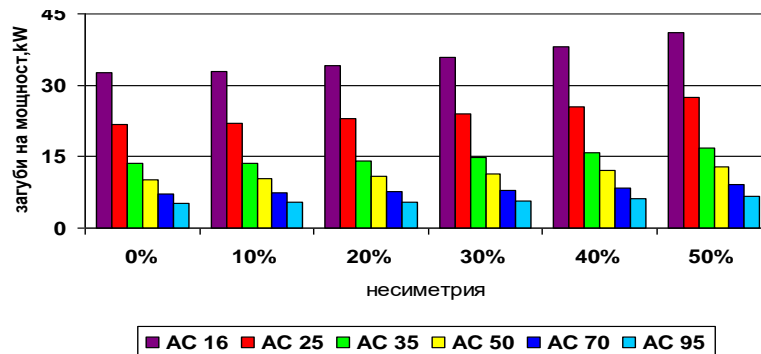
Загубите на мощност при несиметрия на товара в зависимост от типа на проводника по двата алгоритъма са изчислени и показани на фиг.3.23.



Фиг.3.23. Загуби на мощност при несиметрия на товара в зависимост от типа на проводника



Фиг.3.24. Загуби на мощност при несиметрия на товара при използване на СТ със схема на свързване на намотките Y/Z_0



Фиг.3.25. Загуби на мощност при несиметрия на товара при използване на СТ със схема на свързване на намотките Y/Y_0

Резултатите от изчисленията на загубите на мощност при различна степен на несиметрия при използване на СТ със схема на свързване на намотките Y/Z_0 са съпоставени на фиг. 3.24

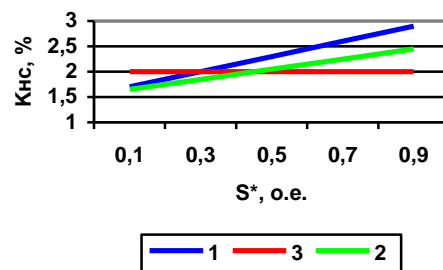
Съпоставката на резултатите от изчисленията на загубите на мощност при използване на СТ със схема на свързване на намотките Y/Y_0 са показани на фиг. 3.25.

Изчисленията при използване на СТ със схема на свързване на намотките Y/Y_0 показват, че пресметнатите стойности, показани на фиг.3.23÷3.25 се увеличават от 5 до 7,3%. Следователно за мрежи НН при несиметрии на товара за препоръчване е да се използва СТ със схема на свързване на намотките Y/Z_0 .

3.4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕПЪЛНОФАЗНИ РЕЖИМИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ

Изчисленията се провеждат за мрежа СН при мощност на генериращите ДЕИ (P_G), равна на мощността на потребителите (P_p). Определя се коефициента на несиметрия поради непълнофазен режим (прекъсване на фаза) в мрежа СН с ДЕИ, съответно при мощности $P_G = 2,25P_p$ и $P_G = P_p$.

За базисна се приема пълната мощност на силовия трансформатор ВН/СН и номиналното междуфазно напрежение на страна СН и резултатите се получават в о.е. Изчисленията се отнасят за случай на прекъсване на фаза А. Изменението на големината на коефициента на несиметрия в присъединителния възел на симетричния ДЕИ са показани на фиг.3.26.



Фиг.3.26. Изчислена (1 и 2) и нормирана стойност (3) на коефициента на несиметрия при непълнофазен режим в мрежа за СН с ДЕИ: 1 - при $P_G = 2,25P_p$; 2 - при $P_G = P_p$

3.5. ИЗВОДИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

- Разработеният математичен модел позволява да се изчислят непълнофазните режими на електрическите мрежи при различно съчетание на големините на мощностите на ДЕИ и потребителите. Показват се случаите, когато несиметрията на режима е недопустима.
- Големината на коефициента на несиметрия на напрежението зависи от типа на несиметрията, дължината на линията, съотношението на мощностите на ДЕИ и на товара.
- За мрежи НН при несиметрии на товара е препоръчително да се използва СТ със схема на свързване на намотките Y/Z_0 , поради по-малки загуби на мощност ($5 \div 7,3\%$).

Глава 4. МОДЕЛИРАНЕ НА ИНДУКТИРАНОТО НАПРЕЖЕНИЕ В ИЗКЛЮЧЕН ПРОВОДНИК НА ТРИФАЗЕН ЕЛЕКТРОПРОВОД

4.1. МОДЕЛИРАНЕ НА ИНДУКТИРАНОТО НАПРЕЖЕНИЕ В НЕЗАЗЕМЕН ИЗКЛЮЧЕН ПРОВОДНИК НА ТРИФАЗЕН ЕЛЕКТРОПРОВОД

Допустимото допирно напрежение е най-голямата стойност на напрежението, която се допуска да се прилага неограничено дълго време при определени условия на външни въздействия. Големината на допирното напрежение зависи от капацитета на проводника, дължината на електропровода, фазното напрежение и съпротивлението на човешкото тяло. Изключване на един проводник на трифазна линия предизвиква индуктиране в него на електростатичен потенциал от останалите неизключени фазови проводници. Тогава допирът до изключения проводник може да е свързан с опасни големина на допирните напрежения. Изключването на проводник от трифазна линия създава надлъжна несиметрия по електропровода.

Целта на изследването е да се разработи методика, софтуер и математични модели за определяне на допирното напрежение поради индуктирано напрежение в незаземен изключен проводник на трифазен електропровод с прилагане на методите за планиране на експеримента.

4.1.1. Индуктиран потенциал в изключен незаземен проводник на трифазна линия

За определяне на индуктирания потенциал в изключен проводник на трифазна линия, предизвикан от останалите неизключени фазови проводници, е необходима големината на средният капацитет за една фаза за 1 km от дължината на въздушния електропровод (ВЕ).

Нека изключеният проводник е С. Резултиращият индуктиран потенциал във фаза С от фази А и В е:

$$(4.4) \quad \varphi_e = \varphi_A + \varphi_B = U_A \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{30}} + U_B \frac{C_{23}}{C_{23} + C_{30}}.$$

където U_A и U_B – са съответно фазните напрежения на фази А и В; C_{13} , C_{23} – са междуфазните капацитети на фази А и С и съответно на фази В и С; C_{30} – капацитетът спрямо земя на фаза С.

Дефинира се коефициентът на капацитивност, който за хоризонтално разположени проводници е:

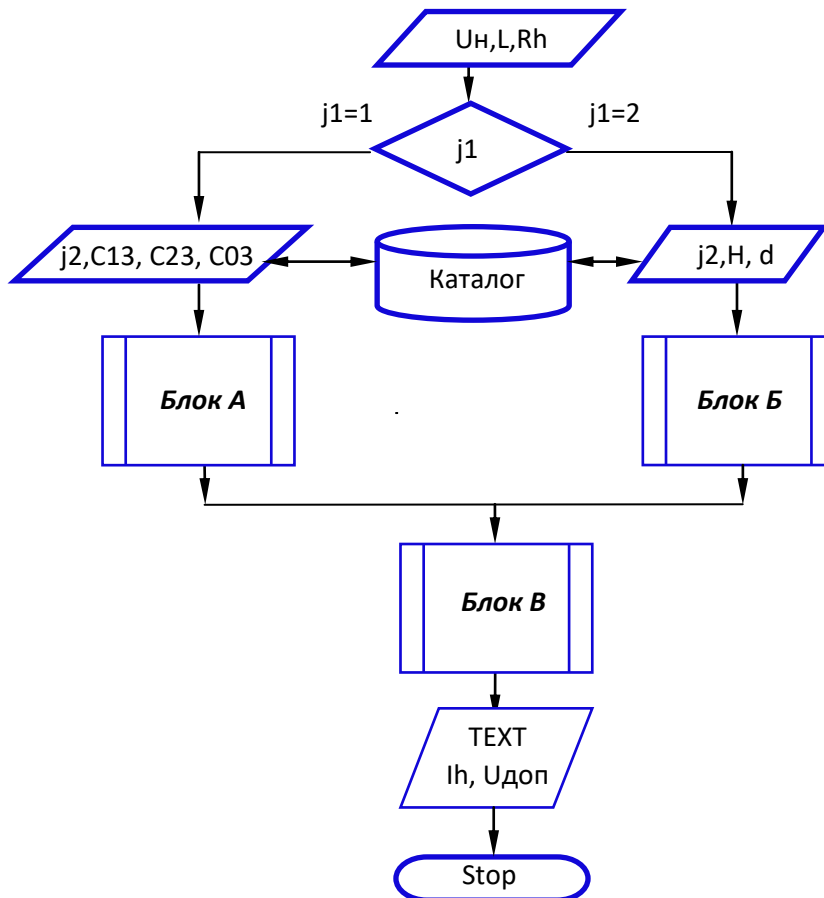
$$(4.5) \quad k = \frac{\ln \frac{2H}{1,26d}}{\ln \frac{2H}{1,26d} + \ln \frac{2H}{r}}.$$

С коефициента k и фазното напрежение се определя резултиращият индуктиран потенциал във фаза С от фази А и В:

(4.6)

$$\varphi_e = kU_\phi$$

Следователно в софтуера за определяне на индуктирания потенциал в изключен проводник на трифазна линия може да се подходи по два начина, в зависимост от разполагаемите данни (фиг.4.1). На фиг.4.1 са приети означенията: $j1$ – индекс за разполагаемост на входни данни: $j1=1$ – налични данни за капацитетите C_{13} , C_{23} , C_{03} ; $j1=2$ – разполагаеми данни за средната височина на окачване на проводниците върху стълба (H) и диаметра на проводника (d); $j2$ – индекс за типа и сечението на проводника, за които се отчитат данните от алгоритмично вградения каталог; Блок А – изчисляване на резултиращия индуктиран потенциал φ_e във фаза С от фази А и В с уравнение (4.4); Блок Б – изчисляване на φ_e във фаза С от фази А и В с уравнения (4.5) и (4.6); Блок В – изчисляване на токът I_h през тялото на човека и допирното напрежение U_d с уравнения (4.7) и (4.8).



Фиг.4.1. Блокова схема за определяне на допирното напрежение, създадено от индуктирания потенциал в изключен проводник на трифазна линия

Токът през човека при допир се определя с :

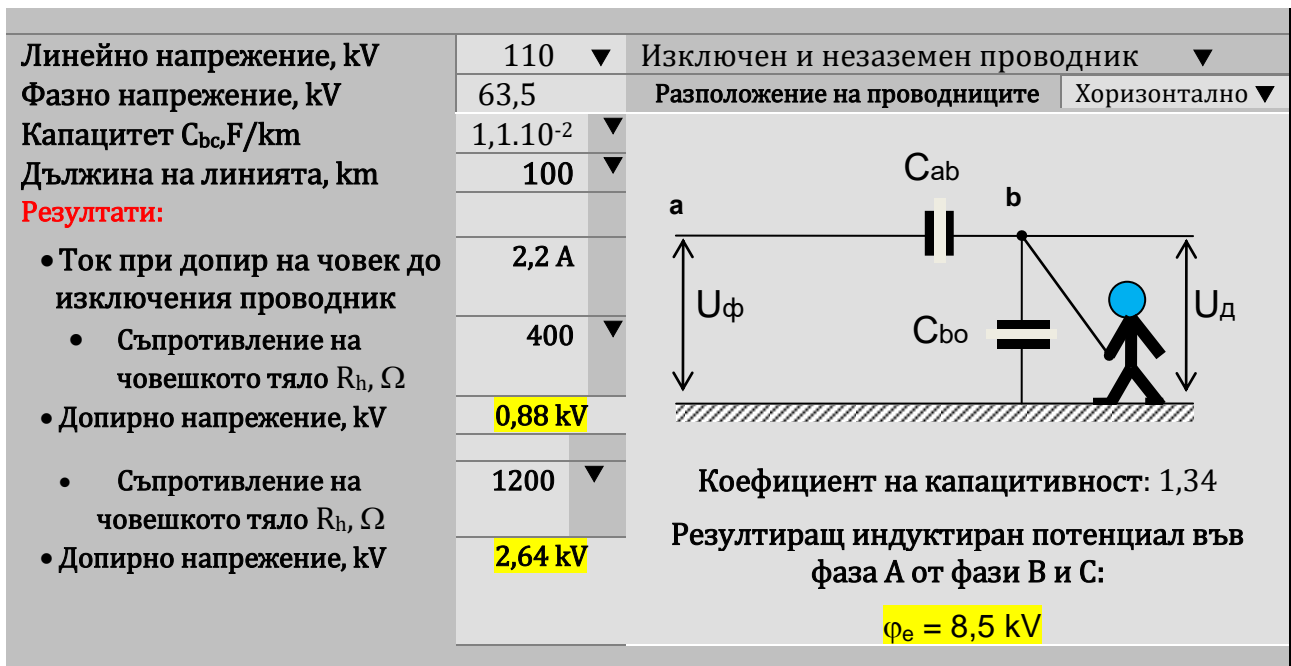
$$(4.7) \quad I_h = \omega C_{ab} l U_\phi$$

Допирното напрежение се изчислява с

$$(4.8) \quad U_d = I_h R_h = \omega C_{ab} l U_\phi R_h$$

където l е дължината на електропровода; R_h – съпротивлението на човешкото тяло.

Изчисленията за изключен и незаземен фазов проводник на електропровод 110 kV са показани на фиг.4.3.



Фиг.4.3. Изчисляване на допирното напрежение при изключен и незаземен фазов проводник на трифазна линия

4.1.2. Провеждане на пълен факторен експеримент за определяне на допирното напрежение при изключен незаземен фазов проводник при номинално напрежение 20 kV

Избира се линеен модел от първи ред за два влияещи фактора:

$$(4.9) \quad y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2,$$

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.

В таблица 4.1 са дадени нивата на влияещите фактори за ВЕ с номинално напрежение 20 kV.

Таблица 4.1. Нива на изменение на влияещите фактори за ВЕ 20 kV

№	Характеристики	Дължина L, km	Съпротивление на човешкото тяло R_h , Ω
1.	Основно ниво ($x_j = 0$)	15,5	1500
2.	Интервал на вариране y_j	14,5	1100
3.	Горно ниво ($x_j = +1$)	30	2600
4.	Долно ниво ($x_j = -1$)	1	400
5.	Код на фактора	x_1	x_2

В таблица 4.2 е даден плана на експеримента.

Таблица 4.2. План на експеримента

№	X_1	X_2	Y
1	-1	-1	7,26
2	+1	-1	217,8
3	-1	+1	47,2
4	+1	+1	1416

В случая отделните опити във всяка точка от плана на експеримента се реализират с изменение на капацитета на различните видове фазови проводници, използвани в разпределителни мрежи за 20 kV. След изчисляване на дисперсиите на опитите се проверява еднородността на дисперсиите по критерия на Кохрен. Изчисляват се коефициентите на регресионното уравнение и се получава следният модел:

$$(4.18) \quad y = 422,065 + 394,835 \cdot x_1 + 309,535 \cdot x_2 + 289,565 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Оценява се значимостта на коефициентите на регресия по критерия на Стюдент. В случая всички коефициенти са значими и по критерия на Фишер моделът (4.18) е адекватен.

4.1.3. Провеждане на пълен факторен експеримент за определяне на допирното напрежение при изключен незаземен фазов проводник при номинално напрежение 110 kV

Избира се линеен модел от първи ред за три влияещи фактора:

$$(4.22) \quad y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,$$

където y е оценъчният параметър; x_1, x_2, x_3 - влияещите фактори в кодиран вид; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$ - коефициентите на регресионното уравнение.

Трите влияещи фактори са: дължината на електропровода, съпротивлението на човешкото тяло и капацитета на електропровода. При съставянето на модел (4.18) за ВЕ 20 kV третият фактор се включва в алгоритъма със средна стойност, което не внася съществена грешка. При ВЕ 110 kV този фактор не може да се пренебрегне. В таблица 4.4 са дадени характеристиките на трите влияещи фактора, а в таблица 4.5 е представен планът на експеримента с 8 опита.

Таблица 4.4. Нива на изменение на влияещите фактори

№	Характеристики	Дължина L, km	Съпротивление на човешкото тяло R_h, Ω	Капацитет C, F/km
1.	Основно ниво ($x_j = 0$)	55	1500	$1,45 \cdot 10^{-9}$
2.	Интервал на вариране y_j	45	1100	$0,35 \cdot 10^{-9}$
3.	Горно ниво ($x_j = +1$)	100	2600	$1,8 \cdot 10^{-9}$
4.	Долно ниво ($x_j = -1$)	10	400	$1,1 \cdot 10^{-9}$
5.	Код на фактора	x_1	x_2	x_3

Таблица 4.5. План на експеримента за ВЕ 110 kV

№	x_1	x_2	x_3	y_i
1	-1	-1	-1	88
2	+1	-1	-1	880
3	-1	+1	-1	572
4	+1	+1	-1	5720
5	-1	-1	+1	144
6	+1	-1	+1	1440
7	-1	+1	+1	936
8	+1	+1	+1	9360

Получава се следният модел:

$$(4.24) \quad y = 2392,5 + 1957,5 \cdot x_1 + 1754,5 \cdot x_2 + 577,5 \cdot x_3 + 1435,5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 472,5 \cdot x_1 \cdot x_3 + 423,5 \cdot x_2 \cdot x_3 + 346,5 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

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

Съгласно този критерий всички коефициенти са значими. Моделът е адекватен в съответствие с критерия на Фишер.

4.2. МОДЕЛИРАНЕ НА ИНДУКТИРАНОТО НАПРЕЖЕНИЕ В ЗАЗЕМЕН ИЗКЛЮЧЕН ПРОВОДНИК НА ТРИФАЗЕН ЕЛЕКТРОПРОВОД

Допирното напрежение при изключен заземен фазов проводник, дължащо се на индуктиране на потенциал от неизключените фазови проводници, е със значително по-ниски стойности, отколкото при незаземен фазов проводник. Съществено влияние върху големината на индуктираното напрежение оказва големината на съпротивлението на заземяване.

Целта е да се състави методика и математични модели за определяне на големината на съпротивлението на заземяване на изключен проводник на трифазен електропровод, при което допирното напрежение е безопасно, като се отчитат индуктираните потенциални от неизключените фазови проводници. Математичните модели се получават с прилагане на методите за планиране на експеримента.

4.2.1. Индуктиран потенциал в изключен заземен проводник на трифазна линия

Допирното напрежение (U_{∂}) при изключен заземен фазов проводник, дължащо се на индуктираните потенциали от неизключените проводници, се изразява с:

$$(4.25) \quad U_{\partial} = \omega C_{ab} l U_{\phi} \frac{R_h R_3}{R_h + R_3}$$

където $\omega = 2\pi f$ – кръговата честота; $f = 50$ Hz; C_{ab} – междуфазовият капацитет; l – дължината на електропровода; U_{ϕ} – фазното напрежение; R_h – съпротивлението на човешкото тяло; R_3 – съпротивлението на заземяване.

Понеже $R_3 \ll R_h$, може да се счита, че $R_h + R_3 = R_h$. Тогава допирното напрежение се определя с

$$(4.26) \quad U_{\partial} = \omega C_{ab} l U_{\phi} R_3.$$

Токът през човека се изразява с

$$(4.27) \quad I_h = \frac{U_{\partial}}{R_h} = \omega C_{ab} l U_{\phi} \frac{R_3}{R_h}.$$

При известно допустимо допирно напрежение $U_{\partial \text{ доп}}$ може да се определи съпротивлението на заземяване $R_{\partial \text{ез}}$, при което допирът до заземяния проводник е безопасен:

$$(4.28) \quad R_{\partial \text{ез}} = \frac{U_{\partial \text{ доп}}}{\omega C_{ab} l U_{\phi}}$$

Определянето на допирното напрежение, токът през човека и съпротивлението на заземителя, при което допирът е безопасен, е показано на фиг.4.4.

Необходимите данни за провеждане на изчисленията са: съпротивлението на заземителя R_3 ; дължината на електропровода l , съпротивлението на човешкото тяло R_h , междуфазния капацитет C_{ab} и допустимото допирно напрежение $U_{\partial \text{ доп}}$.

Линейно напрежение, kV	110	Изключен и заземен проводник
Фазно напрежение, kV	63,5	Разположение на проводниците
Капацитет C_{ab} , F/km	$1,1 \cdot 10^{-9}$	Хоризонтално
Дължина на линията, km	100	
Резултати:		
• Допирно напрежение, V	44 V	
• Съпротивление на човешкото тяло R_h , Ω	400	
• Ток при допир на човек до изключения проводник	0,11 A	
• Съпротивление на човешкото тяло R_h , Ω	1200	Съпротивление на заземителя: 20 Ω
• Ток при допир на човек до изключения проводник	0,037 A	Допустимо допирно напрежение: 6 V
		Съпротивление на заземителя, при което допирът е безопасен: 2,7 Ω

Фиг.4.4. Определяне на допирното напрежение, токът през човека и съпротивлението на заземителя, при което допирът е безопасен

4.2.2. Провеждане на пълен факторен експеримент за определяне на съпротивлението на заземителя, при което допирното напрежение е безопасно при изключен заземен фазов проводник

Избира се линеен модел от първи ред. В таблица 4.6 са дадени нивата на изменение на влияещите фактори за линии 110 kV, а в таблица 4.7 е представен планът на експеримента.

Таблица 4.6. Нива на изменение на влияещите фактори за линии 110 kV

№	Характеристики	Дължина L, km	Допустимо допирно напрежение $U_{d \text{ доп.}}$, V	Междуфазен капацитет C, F/km
1.	Основно ниво ($x_j = 0$)	55	9	$1,45 \cdot 10^{-9}$
2.	Интервал на вариране y_j	45	3	$0,35 \cdot 10^{-9}$
3.	Горно ниво ($x_j = +1$)	100	12	$1,8 \cdot 10^{-9}$
4.	Долно ниво ($x_j = -1$)	10	6	$1,1 \cdot 10^{-9}$
5.	Код на фактора	x_1	x_2	x_3

Таблица 4.7. Матрицата на плана на експеримента

№	x_1	x_2	x_3	y_i
1	-1	-1	-1	27,3
2	+1	-1	-1	54,6
3	-1	+1	-1	16,7
4	+1	+1	-1	33,4
5	-1	-1	+1	2,7
6	+1	-1	+1	5,5
7	-1	+1	+1	1,7
8	+1	+1	+1	6,8

Получава се следният адекватен модел:

$$(4.33) \quad y = 18,6 + 6,5 \cdot x_1 - 3,9 \cdot x_2 - 14,4 \cdot x_3 - 4,5 \cdot x_1 \cdot x_2 - 4,5 \cdot x_1 x_3 + 4 \cdot x_2 x_3 + 1,6 \cdot x_1 x_2 x_3.$$

В таблица 4.8 са дадени нивата на изменение на влияещите фактори за линии 20 kV, а в таблица 4.9 е представен планът на експеримента.

Таблица 4.8. Нива на изменение на влияещите фактори за линии 20 kV

№	Характеристики	Дължина L, km	Допустимо допирно напрежение $U_{\partial \text{ доп, V}}$
1.	Основно ниво ($x_j = 0$)	15,5	9
2.	Интервал на вариране y_j	14,5	3
3.	Горно ниво ($x_j = +1$)	30	12
4.	Долно ниво ($x_j = -1$)	1	6
5.	Код на фактора	x_1	x_2

Таблица 4.9. Матрицата на плана на експеримента

№	x_1	x_2	y_i
1	-1	-1	3,34
2	+1	-1	50,1
3	-1	+1	6,68
4	+1	+1	100,2

Коефициентите на регресионното уравнение са следните:

$$(4.34) \quad a_0=40,08; \quad a_1=35,07; \quad a_2=13,36; \quad a_{12}=11,69.$$

След проверката на значимостта на коефициентите се получава следният адекватен математичен модел за линии 20 kV:

$$(4.35) \quad y = 40,08 + 35,07 \cdot x_1 + 13,36 \cdot x_2 + 11,69 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

След поставяне на големините на кодираните стойности на влияещите фактори x_1 и x_2 в модела (4.35) се получават търсените стойности на съпротивлението на заземяване, при което допирните напрежения са безопасни.

4.3. ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

- Изключване на един незаземен проводник на трифазна линия предизвиква индуктиране в него на електростатичен потенциал от останалите неизключени фазови проводници. В тези условия допирът до изключения проводник може да е свързан с опасни големини на допирните напрежения.
- Големината на допирното напрежение при докосване на изключен и незаземен фазов проводник на трифазна линия зависи от капацитета на проводника, дължината на линията и съпротивлението на човешкото тяло.
- Получените адекватни математични модели с прилагане на математичната теория за планиране на експеримента позволяват да се определят големините на допирните напрежения. Адекватният модел за електрическа мрежа за 20 kV е линеен от първи ред за два фактора, а за високо напрежение 110 kV – съответно за три фактора.
- Допирното напрежение при изключен заземен фазов проводник, дължащо се на индуктиране на потенциал от неизключените фазови проводници, е с много пониски стойности, отколкото при незаземен фазов проводник.
- С разработеният софтуер може да се изчислява токът при допир на човек до изключения проводник и съпротивлението на заземителя, при което допирното напрежение е безопасно.

- Получените адекватни математични модели позволяват да се определя съпротивлението на заземителя, при което допирното напрежение е безопасно при изключен заземен фазов проводник.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

По-съществените приноси в дисертацията са:

- Създадена е методика и софтуер, които позволяват да се определят стойностите на присъединяваните мощности от ДЕИ по условието за пропускателна способност в мрежи за НН и за СН, изградени с въздушни и кабелни линии, при зададени типове и сечения на проводниците или на тоководещите жила на кабелите и съответни стойности на фактора на мощността.
- Разработен е математичен модел, който позволява да се изчислят несиметричните режими на електрическите мрежи при различно съчетание на големините на мощностите на ДЕИ и потребителите. Показват се случаите, когато несиметрията на режима е недопустима.
- Създадени са алгоритми за изчисляване на режимните параметри при несиметрии в електрическите мрежи за НН, които отчитат групата на свързване на захранващия СТ. В резултат на изчисленията се установява, че за мрежи НН при несиметрии на товара е препоръчително да се използва СТ със схема на свързване на намотките Y/Z_0 , поради по-малки загуби на мощност ($5\div 7,3\%$).
- Разработен е математичен модел, който позволява да се изчислят непълнофазните режими на електрическите мрежи при различни експлоатационни условия.
- Получени са адекватни математични модели с прилагане на математичната теория за планиране на експеримента, с които се определят големините на допирните напрежения, получавани при допир до изключен незаземен проводник на трифазна линия, поради предизвикано в него индуктиране на електростатичен потенциал от останалите неизключени фазови проводници. Адекватният модел за електрическа мрежа за 20 kV е линеен от първи ред за два фактора, а за 110 kV – съответно за три фактора.
- Съставени са адекватни математични модели с прилагане на математичната теория за планиране на експеримента, с които се определя допирното напрежение при изключен заземен фазов проводник, дължащо се на индуктиране на потенциал от неизключените фазови проводници. С разработеният софтуер може да се изчислява токът при допир на човек до изключен проводник и съпротивлението на заземителя, при което допирното напрежение е безопасно.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Неделчева С.И., С.П.Петров. Пропускателна способност в разпределителни мрежи с децентрализирани енергийни източници. ISSN 1312-3920, Сп.Известия на ТУ-Сливен, № 2, 2017.
2. Неделчева С.И., С.П.Петров. Определяне на пропускателна способност в следаварийни режими в електрически мрежи с децентрализирани източници. ISSN 1312-3920, Сп.Известия на ТУ-Сливен, № 2, 2017.
3. Неделчева С.И., С.П.Петров. Анализ на несиметричните режими в електрически мрежи за ниско напрежение с децентрализирани генериращи източници в следаварийни режими. ISSN 1312-3920, Сп.Известия на ТУ-Сливен, № 4, 2018.
4. Петров С.П. Следене на режимните параметри в разпределителни електрически мрежи. ISSN 1312-3920, Сп.Известия на ТУ-Сливен, № 4, 2019.

5. Мацанков М.И., С.П.Петров. Изследване на напреженията във възлите на едноконтурна мрежа с децентрализирани източници. XXI Конференция за студентско научно творчество с международно участие, БСУ, Бургас, 2 .04.2020 г.

6. Misho Matsankov M.I., S.P. Petrov. Modeling of the induced voltage in a disconnected ungrounded conductor of a three-phase power line. IN4PL 2021, Portugal, 25-27 October 2021.

7. Matsankov M.I., S.P. Petrov. Modeling of the induced voltage in the disconnected grounded conductor of a three-phase power line. ICSCGE 2021, Nov 20-22, 2021.

Investigation of post-emergency modes in electrical networks with decentralized power-generating sources

Stoyan Petrov Petrov

Abstract

The most significant contributions in the dissertation are:

- A methodology and software, allowing to determine the values of the connected power from DES (decentralized energy sources) under the condition for throughput in LV(low-voltage) and MV(medium-voltage) networks, built with overhead and cable lines, at given types and cross-sections of the conductors or the current-carrying cables and corresponding values of the power factor, have been created.
- A mathematical mode, allowing to calculate the asymmetric modes of the electric networks at different combinations of the DES and consumers' power, has been developed. The cases, in which the asymmetry of the mode is inadmissible, are shown.
- Algorithms for calculation of the mode parameters in case of asymmetries in the LV electrical networks have been created, taking into account the connection group (CG) of the power transformer (PT). As a result of the calculations it has been established that for LV networks in case of load asymmetries it is recommended to use a PT with a scheme of connection of the windings Y/ Z_0 , due to smaller power losses ($5 \div 7.3\%$).
- A mathematical model has been developed, allowing to calculate the incomplete phase modes of the electrical networks under different operating conditions.
- Adequate mathematical models have been obtained with the application of the mathematical theory for experiment planning, by means of which the magnitudes of the contact voltages are obtained at the moment of establishing a contact with a disconnected unearthed conductor in a three-phase line, due to the induced electrostatic potential by the other not disconnected phase conductors. The adequate model for a 20 kV electrical network is a linear model of the first order for two factors, and for 110 kV - for three factors, respectively.
- By applying the mathematical theory for experiment planning, adequate mathematical models have been developed, determining the contact voltage when the ground phase conductor is switched off, which is due to the induction of potential by the not disconnected phase conductors. With the developed software it is possible to calculate the current when a person touches the disconnected conductor and the resistance of the earthing conductor, at which the contact voltage is safe.