

СИМУЛАЦИОНЕН МЕТОД ЗА ПОДОБРЯВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ДАЛЕКОПРОВОДИТЕ ОТ ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ

Васил Иванов

Университет „Проф. д-р Асен Златаров“ – Бургас

Резюме

Електрическите мрежи са основното звено в пренасянето и разпределянето на електрическата енергия по далекопроводите. Ефективността на работата им е свързана с малко загуби на енергия и високо качество на доставяния ток и напрежение по време на експлоатацията им.

За контрол и управление параметрите на мрежите се прилагат съвременни методи на моделиране, мониторинг и запис. Целта на моделирането е избор на най-ефективен вариант за намаляване на загубите и оптимизиране работата на конкретната мрежа.

Въведение

Качествените показатели на електрическите мрежи са свързани с поддържане фактора на мощността близък до единица. Компютърните системи се включват в измерването и мониторинга, като управляват автоматично включването или изключването на устройствата за компенсация на реактивна мощност. В по-слабо натоварени участъци на мрежата реактивната мощност е в повече и компенсацията ѝ се изключва автоматично. При натоварените мрежи има недостиг и трябва да бъде добавена енергия чрез дистанционно включване на компенсиращо устройство.

● **Въздействие на реактивната мощност върху фактора на мощност ($\cos\phi$) при предаването на енергия на дълги разстояния (далекопроводи);**

Първичната енергия (механична, светлинна, топлинна, химична и др.) в централите се преобразува в електрическа, чрез синхронни генератори. Полезната активна мощност се получава от механичното завъртане на ротора, а реактивната мощност се генерира от магнитният поток във възбудителната намотка на индуктора. Следващият етап от преобразуването е повишаване на напрежението чрез трансформаторите, за пренасяне на големи разстояния по далекопроводите с минимални загуби.

Синхронната работа на електрическите системи включва два вида електрически товари: с преобладаващ активен и активно-индуктивен характер.

При чисто активен характер на консуматорите, електрическият ток е синусоидален във фаза с напрежението. За електрическата мрежа това е ефективният

вариант, защото консумацията на реактивна енергия е минимална и $\cos\varphi$ клони към единица.

При активно-индуктивен характер на консуматорите в електрическата мрежа се включват електромотори, трансформатори и индукционни пещи. В този случай електрическият ток изостава от напрежението на ъгъл φ . Факторът на мощност се влошава, което води до загуби на енергия и несиметрия в трифазните линии.

- Основната цел за поддържане на висока стойност на фактора на мощност е консуматорите с преобладаващ капацитивен характер (генериращи електрически полета) и тези с преобладаващ индуктивен характер (генериращи електромагнитните полета), при съвместната си работа да се балансират до нулева реактивна мощност.

- **Причини за влошаване на фактора на мощност ($\cos\varphi$).**

Големите консуматори на реактивна енергия включват в работните си графици масово асинхронни двигатели, трансформатори, заваръчни агрегати и др.. На празен ход асинхронните машини консумират малко активна мощност, като получават около 60 до 70% от реактивната мощност, съответстваща на максимално натоварване. Правилното проектиране и експлоатацията на работните машини в съвременните предприятия е предпоставка за подобряване на $\cos\varphi$.

Масово използваните в бита и производството съвременни устройства от вида на импулсните преобразуватели генерират ток с несинусоидална форма, което се свързва със загуби, поради появата на висши хармоници. Броят на консуматорите работещи с нисък $\cos\varphi$ нараства, като тук се включват токоизправителите, бобините, апаратите на различни релейни защиты, прекъсвачи с електромагнитно задвижване и всички устройства използващи електронни компоненти, което е причина за влошени качествени показатели на мрежата.

- **Заряден капацитет като характерен параметър на електропроводите;**

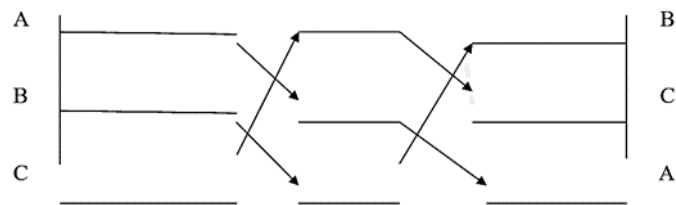
При въздушните електропроводи за напрежения 110kV и по – високи, се взема под внимание капацитивната проводимост B_C . Големината ѝ зависи от номиналното напрежение, разпределението на броят фази на кабелните линии и дължината им.

Методи за компенсация на реактивната енергия по далекопроводи 110kV;

- **Статичните кондензатори (кондензаторни батерии)** са най - разпространените устройства за компенсация за средно напрежение в енергоемките промишлени предприятия [1, 2]. Основната задача на статичните кондензатори е да зареждат, при необходимост електрическата мрежа, с капацитивна мощност като компенсират реактивна индуктивна мощност. Този метод на решение се явява като определящ фактор

за оптимизация на ефективността, не само в различните звена на енергетиката и електрооборудването, но и на основни технологични процеси, използващи електрическа енергия.

- **Синхронните компенсатори** са синхронни машини работещи в два режима като генерират или консумират реактивна енергия, чрез регулиране големината на възбудителния ток в индуктора и стабилизират фактора на мощност ($\cos\varphi$).
- **Компенсиращите реактори** се изработват от възбудителна намотка, навита върху магнитопровод с въздушна междина, която дава възможност за регулиране големината на индуктивното съпротивление. По този начин се компенсира реактивната капацитивната енергия в далекопроводите.
- **Транспозицията на кабелните линии** като метод е размяна местата на фазите през равни интервали по дължината на далекопровода (фиг.1.).



Фиг.1. Схема на трифазна транспозиция между електропроводите;

Съществуващата несиметрия в разстоянията за всяка отделна фаза от далекопровода променя индуктивното съпротивление X_L и капацитивната проводимост B_C и води също до несиметрия между фазовите токове и напрежения. По този начин се нарушава нормалната работа на трифазните консуматори. За неутрализиране на несиметрията, е необходимо проводниците да разменят местата си през равни интервали от дължината на далекопровода. Това води до по-добра ефективност на работата на трифазните системи.

• **Цел на темата: Симулационен метод за подобряване ефективността на далекопроводите от електрическите мрежи;**

- Създаване модели на далекопроводи с дължини 50, 200 и 500км и симулирането им в програмна среда на Simulink.

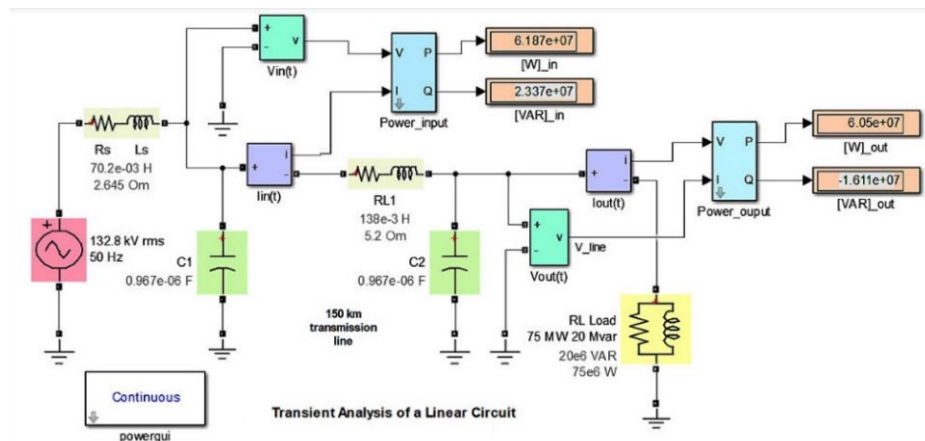
- Чрез задаване на няколко номинални напрежения и стандартни дължини на далекопроводите се моделират ефекти от загуба на енергия и начините за компенсиране.

- Моделира се и режим на късо съединение, който се управлява от релейните защиты към далекопроводите.

- Сравняване резултатите от симулацията без добавяне и с включване на компенсиращи елементи. Анализиране на резултатите и съставяне на изводи и заключения.

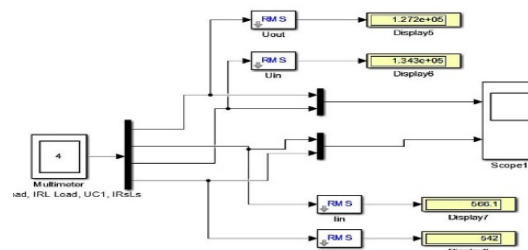
• Моделиране на електроенергийна система с дължина на далекопровода 150км.

Принципната схема на електроенергийна система (ЕЕС) свързваща генератор и консуматор по далекопровод 150км., е показана на фиг.2. и е моделирана чрез програмния продукт Simulink [3, 4, 5].



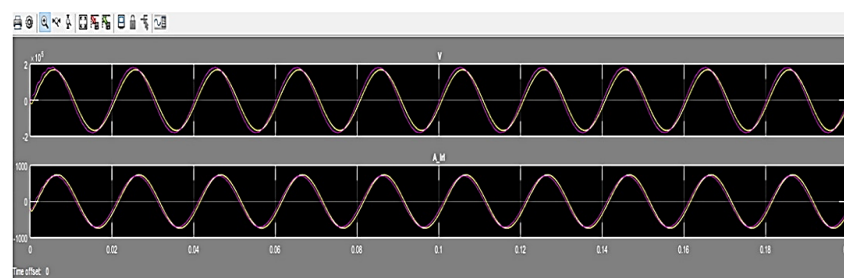
Фиг.2. Мнемо-схема моделираща далекопровод с дължина 150км и стартирана в Simulink;

Елементите моделиращи параметрите на далекопровод от фиг.2. са зарядните C1, C2 и RL1, който отразява загубите в проводника с дължина 150км, като активно-индуктивен елемент.



Фиг.3. Мнемо-схема на измервателната система от прибори в Simulink;

Блоковете (RMS) от фиг.3. преди дисплеите измерват и преобразуват в ефективни стойности тока и напрежението.

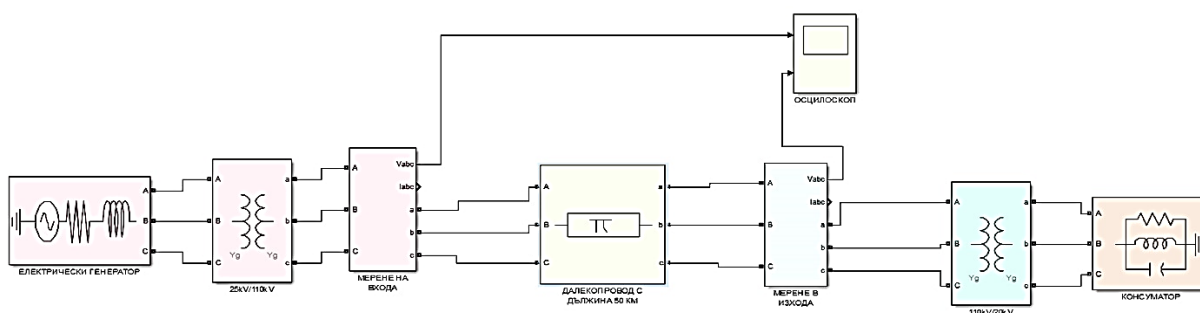


Фиг.4. Резултати от измервания с осцилоскоп на входа и изхода на далекопровода;

При отчетените на фиг.4. синусоиди на напреженията се наблюдава незначително закъснение на изходната вълна поради индуктивно-резистивния характер на проводника.

- **Симулация на далекопровод с дължина 50км за напрежение 110kV;**

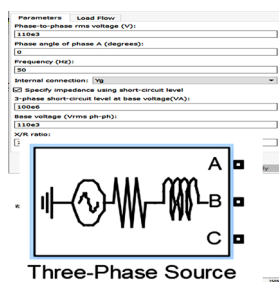
Функционалната блок схема от фиг.5. е модел на източник на променливо напрежение за 25kV, имитиращ синхронен генератор от електрическа централа. След генератора е включен повишаващ силов трифазен трансформатор 25kV/110kV, чийто изход е към далекопровод, моделиращ дължина 50км. Моделът на понижаващ силов трифазен трансформатор 110kV/20kV е свързан с вторичната си намотка към симетричен комплексен консуматор.



Фиг.5. Моделиране на електрическа мрежа за 110kV и далекопровод с дължина 50км без компенсация за загуби на мощност;

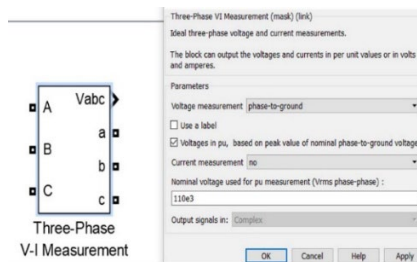
Етапи от настройките на блоковете от фиг. 5 в програмна среда Simulink;

1. Синусоидален трифазен източник на напрежение;



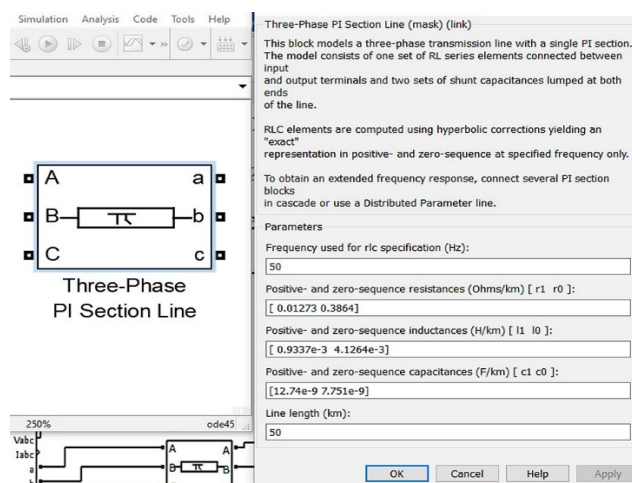
Фиг.6. Мнемо схема на блок трифазен генератор с меню за задаване на параметрите;

2. Моделиране на трифазен измерител на променливо напрежение;



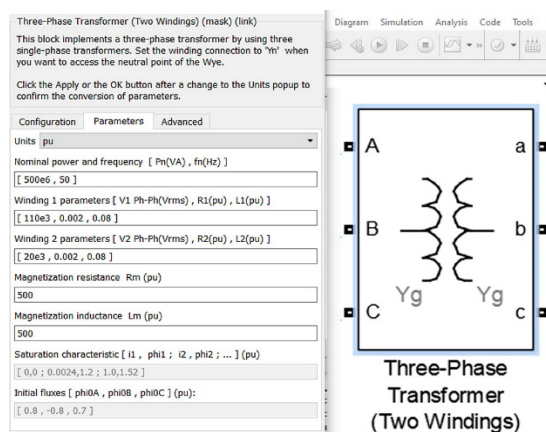
Фиг.7. Мнемо схема на блок трифазно измерване с опция в диалогов прозорец на стойността на напрежението;

3. Моделиране на трифазен далекопровод за дължина 50км с опции за зададен капацитет и индуктивност;

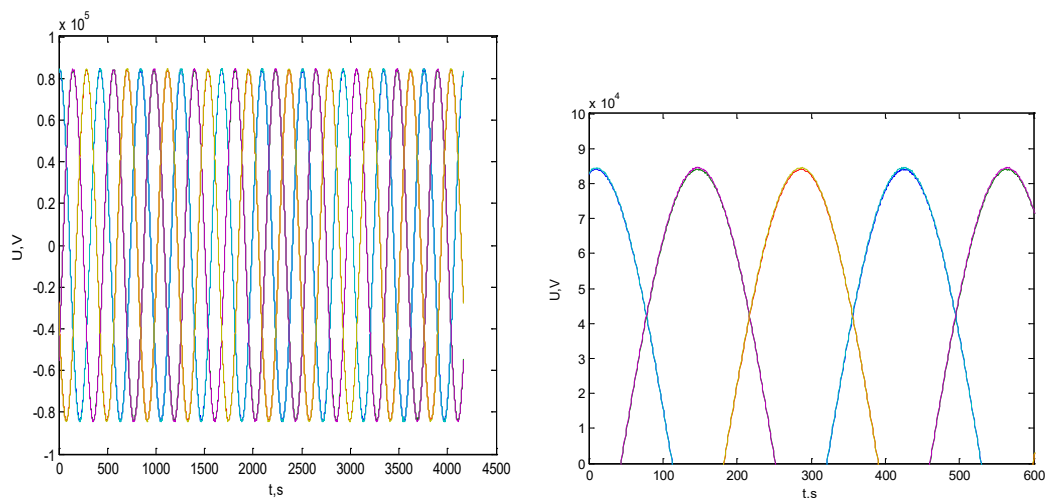


Фиг.8. Блок на далекопровод за 50км и диалогов прозорец със зададени параметри;

4. Моделиране на трифазен силов трансформатор от понижаващ вид;



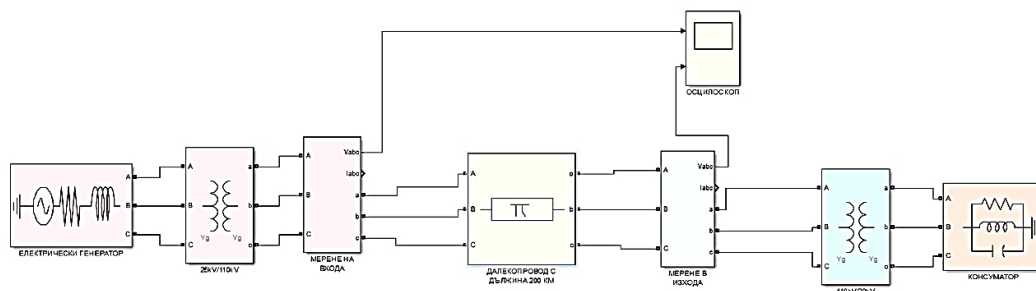
Фиг.9. Диалогов прозорец с параметри за трифазен силов трансформатор;



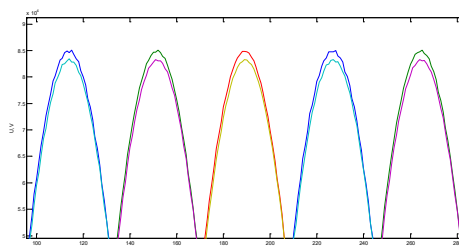
Фиг.10. Графики от напрежението за далекопровода с дължина 50км, без компенсация
Вдясно е показана увеличена диаграмата само на положителните полупериоди;

Анализирайки резултатите от диаграмите на симулацията от фиг.10 се отчита, че за напрежението в началото и края на далекопровода т.е. на къси разстояния 50-100км няма необходимост от компенсиращи устройства.

- Симулация на далекопровод с дължина 200км за напрежение 110kV без компенсация на фактора на мощност ($\cos\phi$);



Фиг.11. Симулация на далекопровод с дължина 200км без компенсация;



Фиг.12. Графика на напреженията на входа и изхода на далекопровод с дължина 200км, измерено от осцилоскопа на фиг.11.;

Моделирането на трифазна кабелна линия с дължина до 200км е показано на фиг.11. като отчетената графика е на фиг.12. При дължина на преносната мрежа от 200км. вече се измерва разлика в напреженията в началото и края на трифазния далекопровод за 110kV и се отчита като пад на загубите;

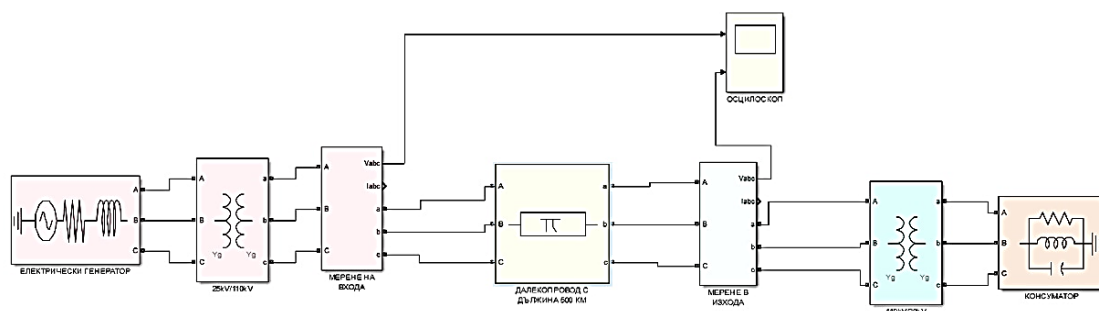
- Анализиране резултатите от измерванията и изводи:

Увеличаване дължината на далекопровода предизвиква пада на напрежение в края на линията и влошаване качеството на енергията.

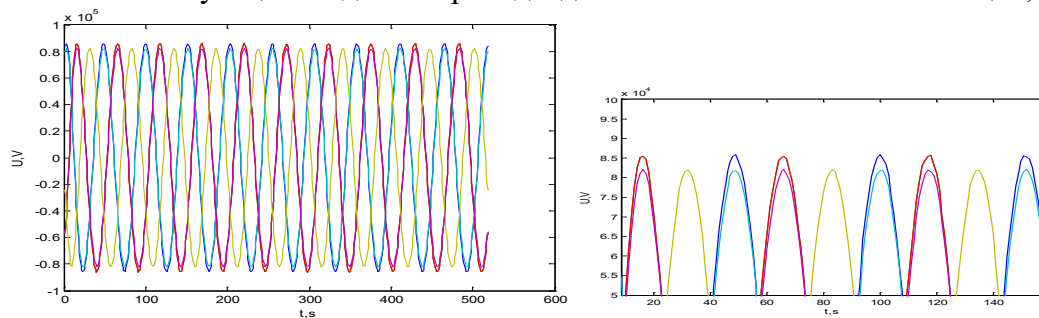
Разликата в стойността на синусоидата на напрежението в края и началото предизвиква загуби на мощност от несиметрия на трите фази от далекопровода;

- Симулация на далекопровод с дължина 500км за напрежение 110kV без компенсация на фактора на мощност ($\cos\phi$);

Резултатите от моделирането на далекопровод с дължина 500км. са отчетени на диаграмата от фиг.14. Анализът на симулацията доказва, че: има големи отклонения на напрежението, генерира се излишна реактивна енергия, което влошава ефективността.



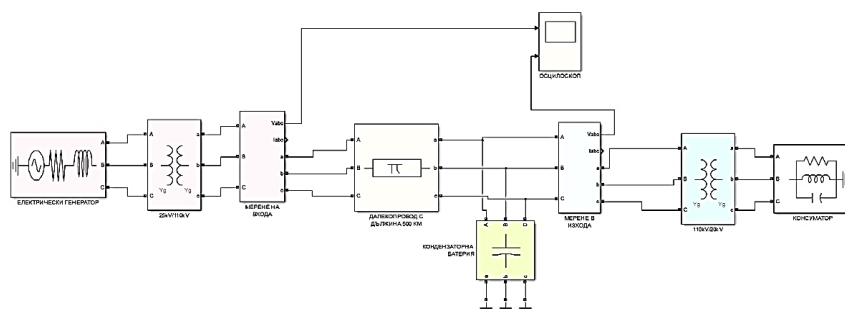
Фиг.13. Симулация на далекопровод с дължина 500 км. без компенсация;



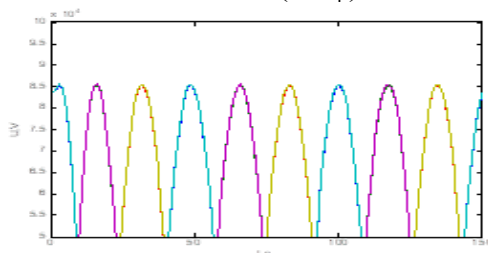
Фиг.14. Графика на напреженията на далекопровод с дължина 500км без компенсация;
Вдясно е показана увеличена диаграма само на положителните полупериоди;

Отчита се и загуба на мощност и несиметрия между тока и напрежението, което влошава фактора на мощност ($\cos\varphi$). Следва извод за необходимост от присъединяване на устройството за компенсация за подобряване на $\cos\varphi$;

- Симулация на далекопровод с дължина 500км за напрежение 110kV с компенсация на фактора на мощност ($\cos\varphi$);



Фиг.15. Симулация на далекопровод с дължина 500км. с компенсация на фактора на мощност ($\cos\varphi$);



Фиг.16. Графично представени положителните полупериоди от напреженията на далекопровод с дължина 500км. с компенсация на фактора на мощност ($\cos\varphi$);

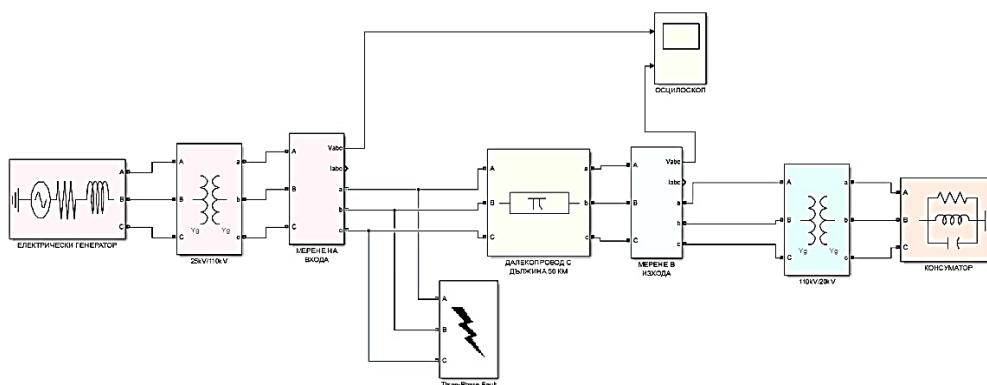
Диаграмата на амплитудите на напреженията от фиг.16. получена с компенсация на реактивна енергия чрез кондензаторна батерия показва стабилни и симетрични полупериоди в сравнение с резултатите от графиката на фиг.14.

Симулация на късо съединение (к.с.) в далекопроводите за 110kV.

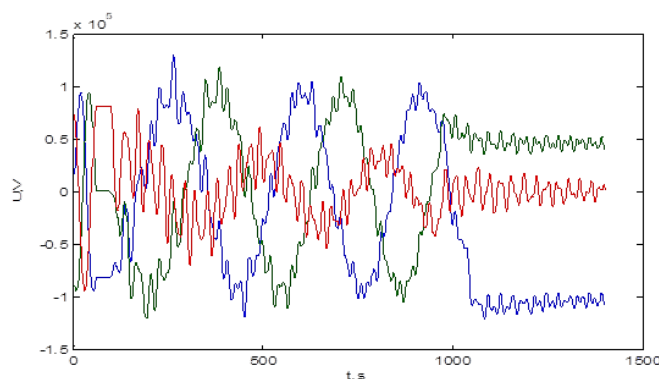
Моделирането на далекопроводите включва и късите съединения, като повечето от тях се дължат, както на краткотрайни нарушения на изолационните разстояния между проводниците, така и с близки заземени обекти. Обикновено това са люлеещи се клони, летящи птици, ледени образувания, замърсявания на изолаторите.

Видимият ефект от късото съединение е мощна електрическа дъга, като в повечето случаи тя сама отстранява причината за късото съединение [1, 2].

Всеки електропровод е предпазен от късо съединение с релейна защита, като тя го изключва от мрежата мигновено и от двете му страни. Включването е автоматично след части от секундата, което определя преходното късо съединение като успешно. Съвременните релейни защиты отчитат точното разстояние до мястото на късото съединение и параметрите му, като големина и продължителност на тока и напрежението, характеризиращи се с определен импеданс.



Фиг.17. Симулация на междуфазно късо съединение в далекопровод за 110kV;



Фиг.18. Графика на междуфазно късо съединение в далекопровод 110kV, отчетено от блока за грешки добавен в мнемо-схемата на фиг.17;

Анализ на резултатите и изводи за ефективността от симулациите;

- За далекопроводи с дължина 100км и напрежение 110kV реактивната енергия се балансира по естествен път и не е необходимо компенсиране на реактивна енергия.

- Компенсацията е по методиката за добавяне на кондензаторна батерия, групово или индивидуално към консуматорите. Стартирането на модела след свързването на компенсиращата батерия изравнява нивата на напрежението в началото и края на далекопровода с дължина от 500км. Качеството на пренесената енергия до консуматорите се подобрява, нормализира се големината на реактивна енергия, намалява се загубата на активна мощност, като се увеличава капацитета на мощност на далекопровода и се компенсират динамичните колебания на мощността.

- Недостатък на този метод за компенсация е възникването понякога на сумарно прекомпенсиране на мрежата. Това налага въвеждането на автоматичен регулатор на реактивната енергия съобразено с режима на натоварване, когато потреблението намалява и напрежението в мрежата се увеличава с над 5% от номиналното. Създават се предпоставки за възникване на пренапрежения и се налага изключване на кондензаторните батерии.

- Проектирането чрез моделиране с компенсация на реактивна енергия е свързано със специфични изчисления за намиране на оптималният вариант. Съвременните методи на изчисления вече включват и програмните продукти за симулация, улесняващи проектирането [6, 7]. Предимство на програмата Simulink е експериментирането с различни варианти на компенсиране и к.с., което намалява финансовите средства за практическа реализация. Поради големите капиталовложения за реализиране на електрическите мрежи все повече фирми изготвят своите проекти чрез съвременен метод – моделиране със софтуерни програмни продукти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нотов П., Неделчева Ст., „Електроенергетика“ - част I, -2011 г. ISBN: 978-954-438-821-8;;
2. Яков В., Стефанов В., Електромеханични устройства и системи, Русе, 2013.;
3. Ivanov V., „Modeling of three-phase inverter power supply system in Simulink“, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1032 (2020) 012054, doi:10.1088/1757-899X/1032/1/012054;
4. Ivanov V., “Simulation, modelling and analysis of a series oscillating circuit”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, (2021, под печат); //doi.org/10.48149/;

5. Ivanov V., “Modeling of single phase inverter system in simulink software”, Assen Zlatarov University, Annual, Vol. XLIX, Book 1, 2020, Burgas 8010, Bulgaria, ISSN 2603-3968;

6. Иванов В., Стоянов Ив., “Спектрален анализ и моделиране процесите на еднофазни инвертори на напрежение управлявани със синусоидална ШИМ”, Списание “Известия на Съюза на учените”- Русе, 2017, том 14, стр. 28 - 33. ISSN 1311-106X;

7. Стоянов, Ив., В. Иванов, Т. Илиев, Е. Иванова, Г. Михайлов. “Моделиране работата на силови електронни преобразуватели на електрическа енергия, използвани във фотоволтаични системи”, Годишник на ТУ-София, том 67, книга 1, стр. 123, 2017, ISSN 1311- 0829;

Адрес за контакти:

гл. ас д-р Васил Борисов Иванов

Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, Бургас

e-mail: vasil_bi@abv.bg, vasil_bi@buhtevy.eu