

ВІДГУК

Офіційного опонента на дисертаційну роботу Ягуп Катерини Валеріївни «Покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів із застосуванням пошукової оптимізації на комп'ютерних моделях», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 358 сторінок основного тексту, включаючи: 99 рисунків по тексту, 43 рисунки на 45 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 305 найменувань використаних джерел інформації на 20 сторінках, 4 додатків на 21 сторінці.

1. Актуальність обраної теми дисертації

В останній час значно збільшується номенклатура навантажень і електроозброєність всіляких галузей – комунально-побутового сектору, сільськогосподарського сектору, міського електротранспорту, залізниць. Такі навантаження вносять значний вклад в погіршення енергетичних показників електротехнічних комплексів. У зв'язку з підвищенням вимог до якості електричної енергії виникає необхідність знаходження нових шляхів підвищення якості електричної енергії в системах електропостачання, які можна було б застосувати із використанням сучасних комп'ютерних та мікроконтролерних технологій.

Тому тема дисертації, що стосується покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів із застосуванням оптимізаційних методів та комп'ютерних моделей систем електропостачання, є актуальною і потребує наукового вирішення.

2. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки і рекомендації дисертації є обґрунтованими і достовірними, тому що вони базуються на фундаментальних законах теоретичної електротехніки, теорії графів, матричних методів розрахунку роботи режимів з несиметричним навантаженням. Достовірність результатів також підтверджує їх збіжність, яка була визначена при використанні різноманітні підходів при розв'язанні одних і тих задач. Наприклад, при розрахунку оптимального режиму в несиметричних трифазних трипровідних системах застосовувався метод складання повної системи рівнянь, яка вирішувалась у програмі MathCAD, а потім ця ж задача була вирішена засобами програми MATLAB. Достовірність результатів визначення оптимального режиму для систем з чотирма проводами засобами програми MATLAB, була підтверджена методом декомпозиції, реалізованої у програмі MathCAD.

3. Основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі

В дисертації Ягуп К. В. отримала такі основні результати, які мають наукову новизну. Вона полягає в тому, що вперше задача пошуку оптимальних режимів роботи системи електропостачання електротехнічних комплексів поставлена як оптимізаційна. Тобто для її вирішення вперше застосовуються оптимізаційні методи у поєднанні із використанням комп'ютерних моделей, та розглянуті можливості їх програмної реалізації за допомогою сучасних пакетів прикладних програм комп'ютерної математики.

Зокрема:

Вперше сформовані критерії та обрані параметри оптимізації, виявлені особливі властивості процесів пошукової оптимізації з метою їх прискорення та покращання збіжності при визначенні оптимальних режимів в електротехнічних системах. Такими властивостями є здатність пошукової оптимізації витискати невідповідний за типом реактивний елемент при синтезі симетро-компенсуючих пристроїв та звільнення параметрів, що дозволяє автоматизувати процес оптимізації при вирішенні задачі синтезу. Вперше запропоновано метод обертання прямої симетричної складової струмів джерел, за допомогою якого на моделі можна отримати параметри СКП для будь-якого симетричного режиму, що дозволило вперше виявити неоднозначність режиму повної компенсації РП в трипровідній СЕП.

Вперше із використанням розроблених методів, які базуються на пошуковій оптимізації із застосуванням комп'ютерних технологій, виконано оптимізацію систем електропостачання із різноманітними споживачами: в трифазних трипровідних та чотирипровідних системах при живленні несиметричних навантажень, систем, із індуктивно-зв'язаними елементами, лампами високого тиску, з дуговими розрядами, асинхронними двигунами, з тиристорними компенсаторами реактивної потужності та активними силовими фільтрами. Розроблені методи вперше застосовані до систем із одночасним підключенням декількох споживачів, з урахуванням окремого внеску споживачів у створення реактивної потужності зсуву, несиметрії та несинусоїдальності в електричній мережі.

Можна стверджувати, що приведені в дисертаційній роботі Ягуп К. В. висновки і рекомендації щодо використання результатів досліджень достатньо обґрунтовані і відповідають вимогам адекватності. Достовірність їх забезпечена коректністю використання математичного апарату та наукових положень, а також підтверджується результатами тестування розроблених методів, моделей та програмних засобів.

4. Повнота викладення в опублікованих працях основних наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи

Основні результати дослідження достатньо ретельно апробовані. Вони доповідались на багатьох науково-технічних конференціях і опубліковані в 41 публікаціях, в тому числі: 7 – статті у журналах, що індексуються Scopus та WEB of Science; 2 – статті в закордонних виданнях; 2 – монографії, 32 – статті у фахових виданнях, що входять до списку ДАК, отримано 1 патент на корисну модель.

5. Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи

Практична цінність результатів дисертаційної роботи надає можливість із застосуванням запропонованих нових методів, що базуються на пошуковій оптимізації із використанням комп'ютерних технологій, забезпечити оптимальні режими роботи систем електропостачання електротехнічних комплексів, в результаті чого досягається підвищення економічних показників, економія паливно-енергетичних ресурсів, зниження втрат електроенергії в лініях електропередачі.

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи в Міжнародний консорціум «Енергозберігання» (м. Харків), ДП «Проектно-вишукувальний інститут «Укрзалізничпроект» залізничного транспорту України» (м. Харків), в Регіональній філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» (м. Харків), у АК «Харківобленерго» (м. Харків), у навчальні процеси в ХНУМГ імені О. М. Бекетова на кафедрі електротранспорту та в НТУ «ХПІ» на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

6. Оцінка змісту дисертації та її завершеності в цілому

Структура дисертації та логіка викладення не викликають заперечень, розподіл матеріалу за розділами складений логічно, в кінці кожного розділу надано висновки та вказано роботи, в яких опубліковано результати розділу.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми та доцільність дисертаційної роботи, формулювання мети та завдань досліджень, основні наукові положення й результати, що винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

Перший розділ присвячено аналізу основних чинників збільшення втрат в мережі, що пов'язані з реактивною потужністю зсуву, несиметрії та несинусоїдальності. Проведена оцінка відомих способів симетрування струмів в лініях електропередачі та компенсації реактивної потужності. Визначені основні складності, які виникають при розрахунках симетро-компенсуючих пристроїв. Показані переваги числових методів для аналізу і оптимізації з реалізацією в сучасних програмних пакетах, що представляється більш перспективним і досконалим у вирішенні задач покращання енергетичних показників, у порівнянні з аналітичними та графічними методами.

У другому розділі розкривається математична сутність методу пошукової оптимізації, розглядається вибір параметрів і критеріїв оптимізації, а також реалізація пошукової оптимізації сучасними програмними засобами в програмах MathCAD та MATLAB.

Досліджено застосування пошукової оптимізації до задачі синтезу електричної системи, що відтворює імпульс заданої форми. Така задача потребує знаходження топології кола і визначення типів його елементів і їх параметрів. В процесі вирішення виявлено властивість пошукової оптимізації витискати неналежний за типом і топологією елемент, що проявляється в намаганні процесу оптимізації

надати значенню параметра невідповідного елемента граничних значень. У такому випадку необхідно виключити такий елемент або замінити його на дуальний. Крім того виявилася можливість звільняти параметри оптимізації шляхом штучного збільшення їх кількості. Завдяки цьому процес оптимізації автоматизується, і при цьому знаходиться рішення для будь-якого локального мінімуму. Параметри, відповідні глобальному мінімуму, знаходяться перерахуванням на основі співвідношень відповідно до фундаментальних законів електротехніки.

Третій розділ присвячений дослідженню застосування розроблених методів щодо оптимізації режимів узагальненої трифазної трипровідної електричної системи. Здійснений розрахунок оптимального режиму та ємностей конденсаторів симетро-компенсуючого пристрою у програмі MathCAD із використанням оптимізаційних алгоритмів із застосуванням оператора given-find. В результаті живильні струми стали симетричними, їх амплітудні значення значно знизилися, реактивна потужність зсуву звелася до нуля. Для порівняння проведено розрахунок параметрів СКП за аналітичним методом, суть якого полягає в подавленні зворотної симетричної складової струму I_2 . Рішення задачі цим методом не забезпечило повного симетрування струмів джерел, а реактивна потужність не була повністю скомпенсованою. Таке дослідження свідчить про переваги методу пошукової оптимізації при визначенні оптимального режиму та синтезі СКП.

Ця задача також вирішена із застосуванням візуальної моделі, складеної у програмі MATLAB. Перевагою такого підходу є те, що система Simulink сама формує рівняння по виду візуальної моделі. В результаті був розрахований оптимальний режим системи електропостачання з тими самими параметрами, як і у попередньому дослідженні.

Побудовані поверхні оптимізації для обраної цільової функції, які дають певне уявлення про складності процесу оптимізації, обумовлені появою ярів.

Розроблено і реалізовано метод оптимізації режиму несиметричної системи, коли цільова функція формується шляхом вимірювань на стороні навантаження за допомогою фільтра симетричної складової зворотної послідовності. Визначено, що в залежності від початкових заданих значень процес оптимізації може виходити на різні варіанти значень параметрів симетро-компенсуючого пристрою. Для приведення системи до оптимального режиму запропонований метод обертання векторів прямої симетричної складової струмів в лініях електропередачі шляхом одночасної зміни величин ємностей симетро-компенсуючого пристрою на одну і ту ж величину. Запропоновано метод переходу від триконденсаторного симетро-компенсуючого пристрою до двоконденсаторного.

Вирішено задачу визначення параметрів симетро-компенсуючого пристрою за критерієм вирівнювання струмів в лініях електропередачі. Визначено, яким чином необхідно сформувати цільову функцію, щоб досягти глобального мінімуму та скомпенсувати реактивну потужність. Із застосуванням такого критерію виявлено наявність ще одного теоретично можливого оптимального режиму, в якому ємності конденсаторів та живильних струмів набувають досить великих значень. Виконаний розрахунок оптимальних режимів із підключенням симетро-компенсуючого пристрою, що складається з однієї котушки індуктивності і двох

конденсаторів, та симетро-компенсуючого пристрою, з одним конденсатором і двома котушками. Ці обставини свідчать про неоднозначність режимів повної компенсації реактивної потужності і можливість симетрування із підключенням симетро-компенсуючого пристрою, в склад якого входять не тільки ємнісні елементи. Можна вважати, що ці результати мають бути признані виключно новими і оригінальними.

Четвертий розділ присвячений дослідженням оптимізації режимів трифазних чотирипровідних систем електропостачання. Запропонований критерій оптимізації, який включає три складові – симетричну складову нульової послідовності, симетричну складову зворотної послідовності і кут симетричної складової прямої послідовності. Для синтезу симетро-компенсуючого пристрою для такої системи використовується виявлена властивість витискання невідповідного елемента з заміною його дуальним елементом. Запропоновано автоматизувати процес оптимізації шляхом застосування методу звільнення параметрів та введенням узагальнених елементів до складу симетро-компенсуючого пристрою. Кожний такий узагальнений елемент складається з пари паралельно підключених котушки індуктивності та конденсатору. Запропоновано після завершення процесу оптимізації виконати заміну кожного узагальненого елемента на один реактивний елемент, тип якого визначається по превалюванню типу реактивності.

Розроблено метод визначення оптимального режиму, що базується на декомпозиції системи електропостачання. Цей метод дозволяє визначити режимні параметри системи без підключення симетро-компенсуючого пристрою, що надає можливість покращити збіжність процесу оптимізації та прискорити комп'ютерний розрахунок параметрів симетро-компенсуючого пристрою. Із застосуванням цього метода визначено всі шість можливих варіантів реалізації симетро-компенсуючого пристрою для виходу на оптимальний режим з повним симетруванням і врівноваженням системи електропостачання.

П'ятий розділ присвячений розрахунку оптимальних режимів для систем електропостачання з індуктивно-зв'язаними елементами. Трансформаторні елементи надзвичайно широко застосовуються в системах електропостачання. Запропонована програма перерахунку паспортних даних трансформаторів у параметри схеми заміщення, які застосовуються у програмі MATLAB. Із використанням розробленої методики, виконано оптимізацію системи, в якій симетро-компенсуючий пристрій підключений через понижувальний трансформатор, в результаті чого встановлено, що збільшення коефіцієнта трансформації призводить до зростання ємностей конденсаторів. Виконано оптимізацію систем електропостачання залізничного транспорту, що живиться змінним струмом. Встановлено, що симетро-компенсуючий пристрій для такого випадку складається з двох конденсаторів і однієї котушки індуктивності. В результаті оптимізації в системі забезпечується режим повної компенсації з роботою трансформатора у симетричному режимі. Цінною є та обставина, що результати цього дослідження знайшли застосування на залізниці при виявленні невідповідностей вимог енергопостачальних організацій при розрахунках за

електроенергію. Побудовані залежності, що дозволяють для заданого навантаження графічно визначити параметри симетро-компенсуючого пристрою. Такі розрахунки можна використовувати і у випадку, коли завантажені дві сторони трикутника тягового трансформатору, із застосуванням методу суперпозиції.

Проведено дослідження процесів у трифазній системі електропостачання, яка знайшла застосування у сільськогосподарському секторі. В такій системі живлення здійснюється від двох вторинних обмоток, а третя вільна обмотка використовується як елемент симетро-компенсуючого пристрою. Виявлено, що при збільшенні індуктивності намагнічування така схема має обмеженні властивості симетрування в певному діапазоні параметрів системи.

Досліджена трифазна чотирипровідна система із підключенням нейтралера. Із застосуванням комп'ютерних моделей встановлено, що підключення нейтралера дійсно врівноважує систему, але не робить її симетричною. Підключення симетро-компенсуючого пристрою до такої системи та виконання пошукової оптимізації здійснює також і симетрування живильних струмів в фазах.

Метод пошукової оптимізації показав свою придатність і при застосуванні його щодо систем електропостачання асинхронних двигунів. Компенсація реактивної потужності, що здійснювалася трикутником компенсуючих конденсаторів, дозволила значно зменшити втрати електроенергії в лініях електропередачі. Також розглянуто варіант оптимізації режиму живлення асинхронного двигуна в умовах несиметрії живильних напруг, при цьому симетруються і зменшуються струми в лініях електропередачі, однак зберігається несиметрія напруг на затискачах асинхронного двигуна.

В шостому розділі розглядається оптимізація процесів в системах електропостачання з нелінійними та силовими напівпровідниковими елементами. Розглянуті системи із дуговим розрядом і лампою високого тиску. В основу складання цих моделей покладені диференціальні нелінійні рівняння, що описують вольт-амперні характеристики таких пристроїв. Із використанням пошукової оптимізації визначені оптимальні режими роботи систем електропостачання з підключенням цих пристроїв.

Виконана точна компенсація реактивної потужності із застосуванням пошукової оптимізації і симетруючих конденсаторів, підключених через реактори, частка реактивності яких вноситься у мережу шляхом регулювання кутів керування зустрічно-паралельно включених реакторів. Вирішена проблема покращання гармонійного складу електричної мережі із підключенням тиристорного компенсатору з одноступінчастою комутацією із застосуванням оптимізаційних методів.

Вирішено питання підвищення якості енергетичних показників за допомогою силових активних фільтрів на основі інверторів на IGBT транзисторах, що керуються за алгоритмами гістерезисної модуляції. Новий підхід при цьому визначається тим, що параметром оптимізації має бути амплітуда еталонного сигналу, яка є єдиною для всіх трьох каналів, у випадку оптимізації трифазної трипровідної системи. Запропоновано критерії оптимізації шляхом врівноваження

активних потужностей на стороні навантаження и на стороні джерел живлення, а також критерій встановлення періодичності напруги на накопичувальному конденсаторі, який живить силовий активний фільтр. Також запропоновано в цільову функцію включити початкову напругу на конденсаторі, що дозволяє встановити напругу на конденсаторі на необхідному рівні, для роботи фільтра в нормальному режимі. Методом пошукової оптимізації з використанням силового активного фільтра за схемою трифазного інвертора здійснена також компенсація реактивної потужності мережі при живленні асинхронного двигуна. При цьому фактично синтезований варіант системи керування силовим активним фільтром, в якому баланс активних потужностей забезпечується стабілізацією постійної складової напруги на накопичувальному конденсаторі фільтра. Цінність такого підходу в тому, що, по-перше, в реальній системі накопичувальний конденсатор завжди буде мати кінцеву ємність, а, по-друге, в запропонованому варіанті системи управління силовим активним фільтром, виключені досить складні перетворення струмів і напруг для отримання корегуючих струмів силового активного фільтра.

Сьомий розділ присвячений оптимізації режимів в електричних системах з декількома навантаженнями з урахуванням вкладу кожного з них у створення реактивної потужності, несиметрії і гармонійних складових у мережі. Розглянуто системи з двома та трьома каскадно ввімкненими навантаженнями, а також система з двома паралельними навантаженнями. Тут правильно вирішена досить неординарна задача формування цільових функцій, які забезпечують справедливий розподіл компенсуючих реактивних потужностей між всіма симетро-компенсуючими пристроями. Таку цільову функцію запропоновано складати як шарову метрику з амплітудних значень зворотних симетричних складових і фазових кутів прямих симетричних складових для струмів в фідерах окремих навантажень. Задача синтезу симетро-компенсуючих пристроїв в системі з трьома каскадно включеними навантаженнями, також успішно розв'язана за допомогою запропонованого методу декомпозиції, причому задача аналізу досить громіздкої системи, що містить велику кількість реактивних елементів різного типу, значно спрощується. Заслугує уваги також оптимізація режиму трифазної чотирипровідної системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями за допомогою силових активних фільтрів, що керуються за оптимізаційним алгоритмом. .

Резюмуючи, можна зазначити, що за змістом дисертаційна робота насичена розв'язаннями досить складних і різноманітних задач, пов'язаних з нагальними практичними потребами підвищення енергетичних показників при електропостачанні електротехнічних систем з різними типами навантажень, що створюють реактивну потужність, несиметрію і нелінійні спотворення струмів та напруг в системі. По мірі вирішення поставлених задач автор пропонує, розвиває і успішно апробує методи і засоби для подолання виникаючих проблем, що заважають отриманню результатів. Сюди можна віднести і виявлені властивості витискання невідповідного елемента симетро-компенсуючого пристрою, і запропонований метод звільнення змінних оптимізації, і метод обертання прямої

симетричної складової живильних струмів, і метод декомпозиції системи електропостачання для знаходження симетричного режиму при відсутності самого симетро-компенсуючого пристрою, і спосіб управління силовим активним фільтром на основі застосування пошукової оптимізації. Запропоновані в розглянутих розділах дисертації положення дійсно скорочують час на отримання необхідних рішень, покращують збіжність процесів рішення, дають змогу отримати результати з високою точністю і максимальним використанням комп'ютерної техніки і сучасного програмного забезпечення і розвантаженням самого розробника від застосування громіздких і складних аналітичних і графічних методів.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

Оцінюючи в цілому дисертаційну роботу Ягуп К. В. позитивно, висловлюю такі зауваження:

1. У підрозділі 1.3 не надано роз'яснень, щодо того, яким чином слід користуватися номограмою визначення потужностей конденсаторів;

2. У розділі 2 твердження про прискорення комп'ютерних розрахунків при використанні методу звільнення параметрів оптимізації, на мою думку, не представляється однозначним; тому що при цьому збільшується кількість змінних оптимізації.

3. Термін «обертання» не здається таким вже однозначно новим, оскільки він зустрічається в технічній літературі за тематикою дисертації. Мається на увазі монографія: А.К.Шидловський, И.В.Мостовяк, В.Г.Кузнецов. Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей.-Киев, Наукова думка,1979. В цій монографії на с.15 говориться про «метод вращения». Чим же запропонований в дисертації метод відрізняється від того методу, який згадується у вищезазначеній монографії?

4. У дисертаційній роботі безпосередньо не вказується, яким чином оптимізація режимів електропостачання електротехнічних комплексів впливає на коефіцієнт корисної дії, кількісні ілюстрації з цього приводу покращили б розуміння переваг симетрування і компенсації реактивної потужності.

5. Розглядаючи оптимізацію режимів систем з асинхронними двигунами, логічно було б розглядати асинхронний двигун, що працює на промисловій частоті 50 Гц, а не 60 Гц;

6. У розділі 5.3 при розрахунку параметрів симетруючого пристрою в тяговій системі електропостачання змінного струму при змінному навантаженні не описана методика, за якою можна визначити типи реактивних елементів узагальненого симетро-компенсуючого пристрою, при навантаженні двома потягами.

7. Підрозділи 6.1 і 6.2, що пов'язані з дослідженням систем з дуговим розрядом і лампою високого тиску, логічно було б оформити, як окремий розділ.

8. У розділі 6.4 не наведена модель з тиристорним компенсатором при підключенні пасивних фільтрів та не приведено відомості про спосіб розрахунків параметрів цих фільтрів на канонічні гармоніки, які необхідно подавити.

8. Загальний висновок

Зауваження, які наведені вище, не порушують основні її положення і не зменшують її наукову новизну та практичну цінність, а отже, й загальну позитивну оцінку.

Врешті матеріал дисертаційної роботи викладено технічно грамотно, у логічній послідовності, ясно і аргументовано. Незначні редакційні похибки не заважають розумінню матеріалу дисертації і автореферату. Дисертація оформлена належним чином, відповідно до вимог МОН України.

Автореферат повною мірою відображає зміст дисертаційної роботи. Ілюстративний матеріал з достатньою інформативністю висвітлює основні наукові результати, викладені в самій дисертаційній роботі..

Таким чином, дисертаційна робота Ягуп К. В. є завершеним науковим дослідженням, зміст якого відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. В дисертаційній роботі на основі результатів виконаних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів та систем із використанням методів, що базуються на застосуванні пошукової оптимізації та комп'ютерних моделей для автоматизованих досліджень та проектування симетро-компенсуючих пристроїв. Новизна і оригінальність матеріалу дисертації не викликає будь-яких сумнівів.

За актуальністю розглянутої проблеми, науковим рівнем, обсягом досліджень та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота також відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів...» щодо дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор, Ягуп Катерина Валеріївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри автоматизації енергосистем
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



 Гриб О. Г.