



ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ГАПАНОВИЧ Володимир Георгійович

УДК 621.316.925

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
РЕЖИМАМИ РОБОТИ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.14.02 - "Електричні станції (електрична частина), мережі, електроенергетичні системи та управління ними"

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Маріуполь-1996

621.31
Дисертацією є рукопис.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00674018 (Q)

Роботу виконано сумісно на кафедрі
"Електричні станції" Державного універ

Науковий керівник

кандидат технічних наук

професор

СТРЯПАН В.М.

- Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
ЛІПСЬКИЙ А.М.
- кандидат технічних наук,
БОЖКО В.М.
Провідна організація - Львівський філіал
"Укренергомережпроект" (м. Львів)

Захист відбудеться 24 Вересня 1996 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої Ради К14.01.01 Приазовського державного технічного університету за адресою 341000, м. Маріуполь, Донецької обл., пр. Республіки, 7, корп. 5, ауд. 5.220

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Приазовського державного технічного університету.

Автореферат розіслано 22 серпня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук, доцент

Савіна Н.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Для покращення показників якості електроенергії (ПЯЕ) в системах електропостачання змінного навантаження (СЕП ЗН) застосовують регулюючі пристрої різних типів, параметри яких вибираються автономно. Наслідком є надлишковість встановленої потужності окремих типів регулюючих пристроїв СЕП ЗН. Тип регулюючого пристрою визначається видом змінного навантаження та режимом його роботи. Одним з основних ПЯЕ в СЕП ЗН є величина коливань напруги та частота їх виникнення, з точки зору якої всі види змінного навантаження знаходяться всередині діапазону, границями якого, з одного боку, є дугові сталеплавильні печі (частота коливань напруги $0,2 \pm 12$ Гц), з другого - шахтне навантаження (частота коливань напруги 50-100 разів за годину). Тому актуальною задачею є створення окремих підсистем та комплексної системи керування режимом роботи СЕП ЗН в цілому, яка б забезпечила покращення ПЯЕ в СЕП усього діапазону видів змінного навантаження при одночасному зменшенні встановленої потужності окремих типів регулюючих пристроїв.

Мета і завдання досліджень - підвищення ефективності функціонування СЕП ЗН шляхом створення комплексних систем керування режимами їх роботи на базі статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності (СТК) для двох граничних видів змінного навантаження - швидкозмінного, нелінійного несиметричного (на прикладі надпотужної дугової сталеплавильної печі (ДСП)) та відносно спокійного симетричного (на прикладі шахтного навантаження). У відповідності з поставленою метою в роботі вирішені наступні задачі:

- визначення найбільших збуджуючих чинників СЕП ЗН та розробка методів їх обмеження;
- розробка структурних схем регуляторів СТК, які базуються на різних алгоритмах керування та різних методах вимірювання параметрів регулювання, та порівняльні дослідження ефективності їх роботи;
- розробка структурної схеми та методики вибору параметрів системи регулювання СТК (СР СТК) для СЕП шахтного навантаження;
- розробка, з врахуванням запропонованих рішень, ефективних алгоритмів роботи комплексної системи керування режимом СЕП ЗН в цілому та окремих її підсистем.

Науковою задачею є розробка алгоритмів керування та структурних схем окремих підсистем та комплексної системи керування режимом роботи СЕП ЗН в цілому для покращення ПЯЕ та експлуатаційних характеристик СЕП ЗН.

Методи досліджень. Вирішення викладених вище завдань проводилось методом математичного та фізичного моделювання окремих об'єктів СЕП ЗН з їх системами керування. Дослідження проводились з використанням лабораторних та натурних експериментів.

Основні наукові результати, їх значення та новизна полягає в наступному:

1. Обґрунтована необхідність створення комплексної системи керування режимом роботи СЕП ЗН та запропонована її структура, яка складається, для СЕП ДСП, з підсистеми обмеження КСН та підсистеми СТК з регулятором, побудованим за розімкненим принципом регулювання, для СЕП шахтного навантаження - з підсистеми РПН трансформатора живлення підстанції та підсистеми СТК з регулятором, побудованим за замкненим принципом регулювання.

2. Вперше розроблений алгоритм керування та структурна схема підсистеми обмеження КСН, яка дозволяє покращити ПЯЕ СЕП ДСП та її експлуатаційні характеристики.

3. Розроблені структурні схеми регуляторів підсистеми СТК, які побудовані за розімкненим принципом регулювання, на основі запропонованих форм запису рівнянь компенсації Штейнмеца та трьох принципово відмінних методів вимірювання параметрів регулювання.

4. Запропонована методика порівняння ефективності роботи регуляторів СТК, критерієм якої є зменшення коливань напруги в точці підключення компенсатора.

5. Визначений необхідний діапазон зміни коефіцієнту передачі контура стабілізації струму тиристорно-реакторної групи (ТРГ) за постійною складовою для квазіусталених та комутаційних режимів роботи СЕП ДСП, при якому досягається ефективна компенсація постійної складової струму вводу системи "навантаження - СТК".

6. Розроблена методика вибору коефіцієнтів неузгодженості по напрузі та струму для підсистеми СТК з регулятором пропорційної дії (замкнений принцип регулювання), яка дозволяє, в залежності від величини збурень режиму СЕП ЗН, визначати чисельні значення коефіцієнтів передачі окремих ланок регулятора.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів, висновків підтверджується коректністю прийнятих допущень та математичних методів, що відповідають характеру поставлених задач, експериментальною перевіркою, даними, отриманими в процесі математичного та фізичного моделювання в лабораторних умовах та на діючих електроенергетичних об'єктах.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Запропонована технічна реалізація підсистеми обмеження КСН, яка захищена авторськими свідоцтвами.

2. Розроблені та захищені авторськими свідоцтвами давач миттєвого струму, інтегральний давач струму, давач реактивної потужності, які реалізують обґрунтовані методи вимірювання параметрів регулювання.

3. Запропоновано в СЕП надпотужних ДСП використовувати, як найбільш ефективні для компенсації коливань напруги, регулятори СТК, які базуються на непрямому методі вимірювання параметрів режиму ємнісної ланки СТК,

використовують в якості алгоритму керування рівняння компенсації у формі реактивних струмів навантаження та обладнані інтегральними давачами струму.

4. На основі розробленої принципової схеми регулятора СТК для СЕП шахтного навантаження виготовлений дослідний взірць, який пройшов експериментальну перевірку.

Реалізація результатів роботи. Результати роботи використовувалися при виконанні госпдоговірних та держбюджетних науково-дослідних робіт, які проводилися в Державному університеті "Львівська політехніка". Регулятор СТК пропорційної дії впроваджений на підстанції "Нововолинська" Львівської енергосистеми.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Методи обмеження КСН в СЕП ДСП.
2. Алгоритми керування, структурні схеми окремих підсистем та комплексної системи керування режимами роботи СЕП ЗН.
3. Структурні схеми давачів параметрів регулювання: давач миттєвого струму, інтегрального давача струму, давача реактивної потужності.
4. Методика досліджень параметрів контура стабілізації струму ТРГ за постійною складовою.
5. Методика порівняння ефективності роботи регуляторів СТК на основі критерію зменшення коливань напруги в точці підключення СТК.
6. Методика вибору коефіцієнтів неузгодженості по нарузі та струму регулятора СТК пропорційної дії.

Апробація роботи. Основні положення та матеріали роботи доповідались на IV Республіканській науково-технічній конференції "Современные проблемы энергетики", м. Київ 1985 р.; на Республіканському семінарі "Преобразовательная техника в электроэнергетических, технологических установках и электроприводах", м. Львів 1987 р.; на III Республіканській науково-технічній конференції "Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике", м. Харків 1988 р.; на I Загальносоюзному науково-технічному симпозіумі "Электроснабжение и электрооборудование дуговых электропечей", м. Тбілісі 1988 р.; на Республіканській науково-технічній конференції "Создание и применение тиристорных преобразователей соизмеримой мощности", м. Харків 1990 р.

Публікації. За темою роботи опубліковано 9 статей, отримано 6 авторських свідоцтв, 2 патенти, опубліковано 5 тез доповідей на конференціях.

Об'єм і структура роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, списку літератури з 177 назв, і 2 додатків. Дисертація викладена на 204 сторінках машинописного тексту, включаючи 52 малюнки, 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведений літературний огляд досліджень впливу на мережу живлення двох граничних видів змінного навантаження - ДСП та шахтного навантаження. Показано, що в квазіусталених режимах роботи змінного навантаження його негативний вплив на мережу живлення може компенсуватися застосуванням СТК. Ефективність роботи СТК, при цьому, в першу чергу визначається характеристиками його системи регулювання.

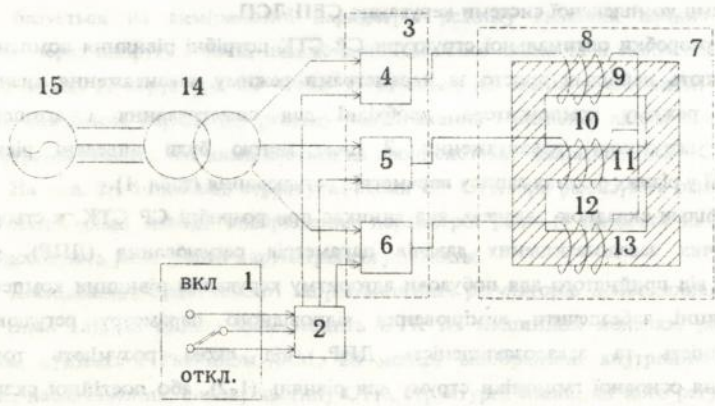
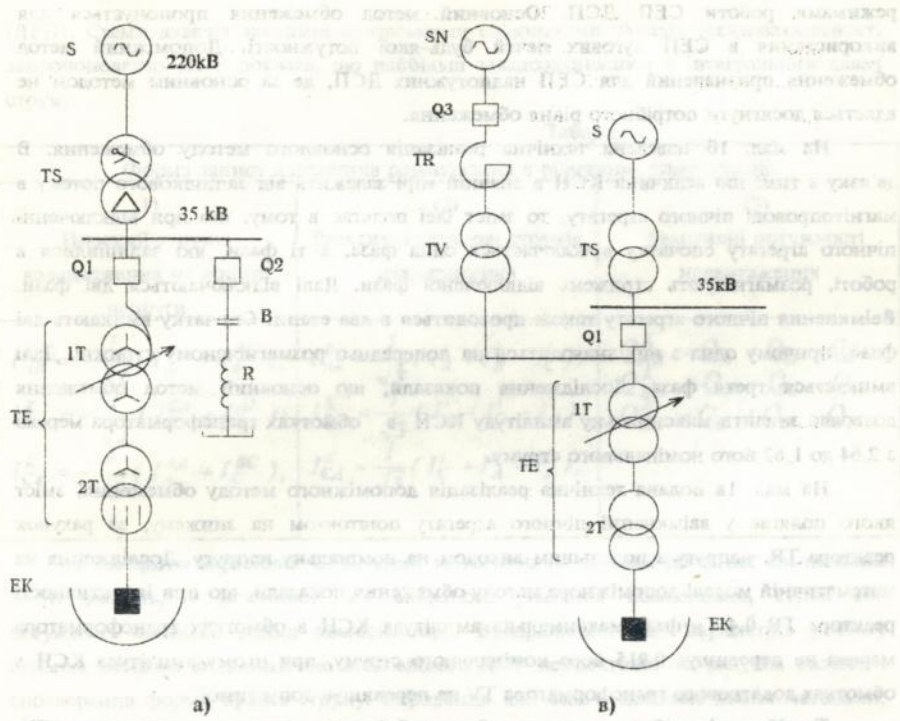
Встановлено, що в комутаційних режимах роботи ДСП СТК не забезпечує необхідних ПЯЕ в СЕП ДСП. Для вирішення цієї задачі необхідна розробка комплексної системи керування СЕП ДСП, яка дозволяє підтримувати нормований рівень ПЯЕ в СЕП ДСП у всіх режимах її роботи.

Показано, що систему регулювання СТК, призначену для роботи в СЕП ДСП, не доцільно використовувати в СЕП шахтного навантаження через дуже велику надлишковість її схеми. Тому задача розробки СР СТК, яка відповідає вимогам стабілізації напруги в точці підключення СТК та створення на базі РПН трансформаторів підстанції та СТК, обладнаного цієї системою регулювання, комплексної системи керування режимами роботи СЕП шахтного навантаження, є актуальною.

Другий розділ роботи присвячений дослідженню електромагнітних процесів ввімкнення пічних агрегатів ДСП, на прикладі СЕП ДСП - 100 НЗА Донецького металзаводу (мал. 1а). Дослідження проводились на математичній моделі мережі з СТК, розробленій у Львівському політехнічному інституті Перхачем В.С., Скрипником О.І., Сегедюю М.С.

Дослідження на математичній моделі процесу ввімкнення пічного агрегату проводились в залежності від чинників, що впливають на кількісні та якісні характеристики кидків струмів намагнічення (КСН). В якості чинників виступали величина напруги живлення, величина та напрямок залишкового магнітного потоку в стрижнях магнітопроводу пічного агрегату, розрахунковий тип КСН (послідовність підключення фаз пічного трансформатора ТЕ), кут ввімкнення. Аналіз результатів математичного експерименту показав, що діапазон зміни КСН складає для пічного агрегату від 0,015 до 9,31 його номінального струму. Для трансформатора мережі цей діапазон складає від 0,03 до 2,64 його номінального струму. Найбільші значення КСН виникають при одночасному ввімкненні двох фаз пічного агрегату в момент переходу через нуль відповідної лінійної напруги і ввімкненні через 90° третьої фази при наявності в стрижнях магнітопроводу пічного агрегату залишкового магнітного потоку величиною 0,9 від номінального. Дія КСН такої величини на обмотки трансформатора мережі звичайного виконання викликає їх деформацію та приводить до пошкодження трансформатора.

Для обмеження КСН були розроблені основний та допоміжний методи обмеження, які реалізовані у вигляді підсистеми комплексної системи керування



б)

Мал.1. Система електропостачання надпотужної ДСП (а) та технічна реалізація основного (б) та допоміжного (в) методів обмеження КСН.

режимами роботи СЕП ДСП. Основний метод обмеження пропонується для використання в СЕП дугових печей будь-якої потужності. Допоміжний метод обмеження призначений для СЕП надпотужних ДСП, де за основним методом не вдається досягнути потрібного рівня обмеження.

На мал. 16 наведена технічна реалізація основного методу обмеження. В зв'язку з тим, що величина КСН в значній мірі залежить від залишкового потоку в магнітопроводі пічного агрегату, то зміст ідеї полягає в тому, що при відключенні пічного агрегату спочатку відключається одна фаза, а ті фази, які залишилися в роботі, розмагнічують стрижень відключеної фази. Далі відключаються дві фази. Ввімкнення пічного агрегату також проводиться в два етапи. Спочатку вмикають дві фази, причому одна з них знаходиться на попередньо розмагніченому стрижні. Далі вмикається третя фаза. Дослідження показали, що основний метод обмеження дозволяє знизити максимальну амплітуду КСН в обмотках трансформатора мережі з 2,64 до 1,62 його номінального струму.

На мал. 1в подана технічна реалізація допоміжного методу обмеження, зміст якого полягає у ввімкненні пічного агрегату пошттовхом на знижену, за рахунок реактора TR, напругу з подальшим виходом на номінальну напругу. Дослідження на математичній моделі допоміжного методу обмеження показали, що при індуктивності реактора TR 0,4 Гн/фазу максимальна амплітуда КСН в обмотках трансформатора мережі не перевищує 0,915 його номінального струму, при цьому амплітуда КСН в обмотках додаткового трансформатора TV не перевищує допустимої.

Третій розділ роботи присвячений розробці та дослідженню регуляторів СТК, як підсистеми комплексної системи керування СЕП ДСП.

Для розробки оптимальної структури СР СТК потрібні рівняння компенсації, які дозволяють найбільш просто за параметрами режиму навантаження визначити параметри режиму компенсатора, необхідні для симетрування і компенсації реактивної потужності навантаження. З цією метою були виведені рівняння компенсації у різних формах запису параметрів регулювання (табл. 1).

Найбільш складною задачею, яка виникає при розробці СР СТК, є створення швидкодіючих заводозахищених давачів параметрів регулювання (ДПР), які в залежності від прийнятого для побудови алгоритму керування рівняння компенсації (1-3) повинні забезпечити вимірювання відповідного параметру регулювання. Швидкодійність та заводозахищеність ДПР, під якою розуміють точність вимірювання основної гармоніки струму для рівнянь (1-2), або постійної складової для рівняння (3), залежать від методу вимірювання параметра регулювання, закладеного в їх конструкцію. Для реєстрації параметрів регулювання (ПР) в СР СТК запропоновано використати наступні принципово відмінні методи вимірювання: точковий метод, інтегральний метод, метод перемноження. Всі три методи вимірювання ПР реалізовані у вигляді дослідних взірців ДПР: давача миттєвого струму (ДМС), інтегрального давача струму (ІДС) і давача реактивної потужності

(ДРП). Схеми давачів захищені авторськими свідоцтвами. Аналіз заводозахисності запропонованих ДПР показав, що найбільш заводозахисним є інтегральний давач струму.

Таблиця 1

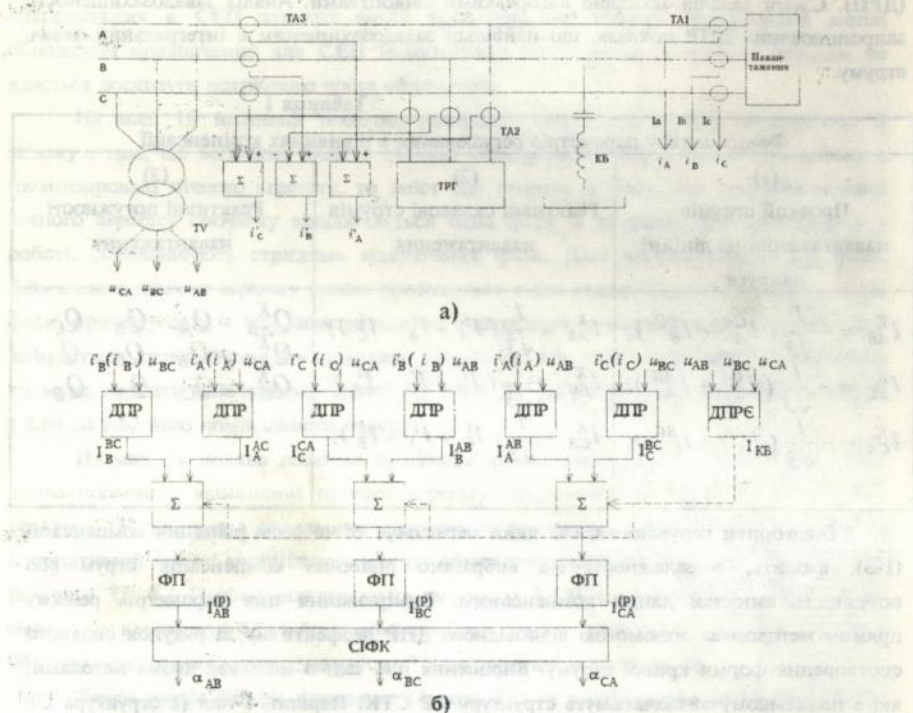
Форма запису параметрів регулювання в рівняннях компенсації		
(1) Проекції струмів навантаження на лінійні напруги	(2) Реактивні складові струмів навантаження	(3) Реактивні потужності навантаження
$I_{AB}^K = -\frac{I}{\sqrt{3}} (I_A^{CA} + I_B^{BC});$	$I_{AB}^K = \frac{I}{\sqrt{3}} (I_A^i + I_B^i - I_C^i);$	$Q_{AB}^K = Q_A + Q_B - Q_C;$
$I_{BC}^K = -\frac{I}{\sqrt{3}} (I_C^{CA} + I_A^{AB});$	$I_{BC}^K = \frac{I}{\sqrt{3}} (I_B^i + I_C^i - I_A^i);$	$Q_{BC}^K = Q_B + Q_C - Q_A;$
$I_{CA}^K = -\frac{I}{\sqrt{3}} (I_A^{AB} + I_C^{BC});$	$I_{CA}^K = \frac{I}{\sqrt{3}} (I_C^i + I_A^i - I_B^i);$	$Q_{CA}^K = Q_C + Q_A - Q_B.$

В алгоритм керування СТК, який застосовує те чи інше рівняння компенсації (1-3), входить, в залежності від вибраного рівняння компенсації, струм або потужність ємнісної ланки компенсатора. Вимірювання цих параметрів режиму прямим методом за допомогою відповідного ДПР неефективне за рахунок сильного спотворення форми кривої струму. Вирішення цієї задачі можливе двома методами, які в подальшому визначатимуть структуру СР СТК. Перший з них (1 структура СР СТК) базується на вимірюванні параметрів режиму ємнісної ланки непрямим методом через напругу в точці підключення ємнісної ланки та її еквівалентний опір. Другий метод (2 структура СР СТК) ґрунтується на заміні в алгоритмі керування окремо вимірних параметрів режиму навантаження і ємнісної ланки компенсатора параметрами режиму, які вимірюються на ввіді системи "навантаження - СТК".

На мал. 2 і 3 наведені структурні схеми СР СТК, які реалізують різні рівняння компенсації, різні методи вимірювання параметрів режиму ємнісної ланки СТК і використовують різні давачі параметрів регулювання.

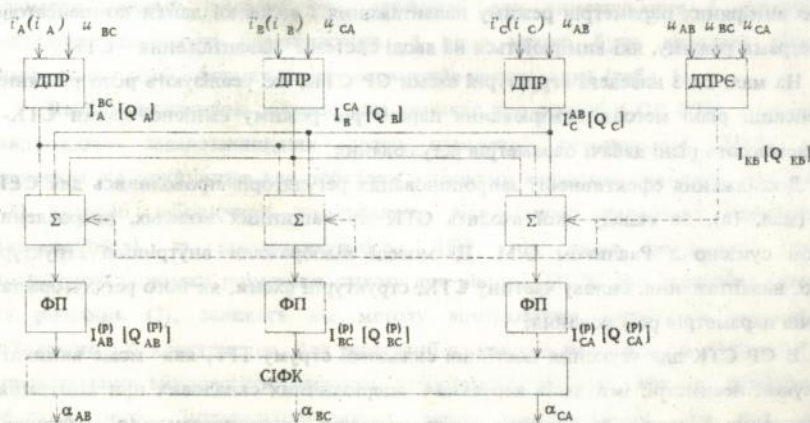
Дослідження ефективності запропонованих регуляторів проводились для СЕП ДСП (мал. 1а), до складу якої входить СТК на машинних моделях, розроблених автором сумісно з Равликом О.М. Ці моделі відображали внутрішню структуру мережі, навантаження, силову частину СТК, структурні схеми, як його регулятора так і давачів параметрів регулювання.

В СР СТК для усунення постійної складової струму ТРГ, яка може виникати за рахунок несиметрії імпульсів керування, аперіодичних складових при комутаціях навантаження і аварійних режимів перетворювачів, використовується додатковий контур стабілізації. В роботі проведені дослідження взаємозв'язку величини коефіцієнта передачі K_{Π} додаткового контура стабілізації, ефективності зменшення



ДПРЕ - давач параметру режиму емнісної ланки
 ФП - функційний перетворювач
 СІФК - система імпульсно-фазового керування

Мал.2. Структурна схема СР СТК, яка реалізує рівняння компенсації (1)



Мал.3. Структурна схема СР СТК, яка реалізує рівняння компенсації (2):
 В квадратних дужках наведені величини, що відповідають реалізації рівняння (3).
 Пунктиром показані структури СР СТК, що реалізують непрямої метод вимірювання параметрів режиму емнісної ланки СТК.
 В круглих дужках наведені струми (мал.2а), що відповідають непрямої методу вимірювання.

постійної складової і динамічних характеристик СТК. Результати досліджень показали, що для квазіусталених режимів роботи ДСП величина коефіцієнта передачі повинна бути рівна 0,4, при цьому забезпечується достатня ефективність зменшення постійної складової в струмі вводу у всьому частотному діапазоні коливань струму навантаження від 5 до 25 Гц. Встановлено, що наявність додаткового контура стабілізації збільшує стійкість регулювання СТК, але погіршує при цьому його динамічні характеристики.

Дослідження ефективності зменшення коливань напруги в точці підключення СТК, обладнаного різними типами розроблених регуляторів (мал. 2, 3), проводилось шляхом математичного експерименту для СЕП ДСП (мал. 1а). Результати досліджень зменшення коливань напруги на шинах 35 кВ СЕП ДСП за допомогою СТК показали, що давачі миттєвого струму дуже чутливі до спотворень форми кривої струму, який вимірюється. В випадку застосування цих давачів в регуляторах 2 структури неможливо забезпечити стійкість регулювання при будь-яких значеннях $K_{\text{п}}$. Регулятори, які реалізують рівняння (1) і (2), практично однакові з точки зору ефективності зменшення коливань напруги, однак регулятор, що використовує рівняння (1), вимагає в два рази більше ДПР. Регулятори, побудовані за 2 структурою, характеризуються взагалі більш низькими показниками ефективності зменшення коливань напруги в порівнянні з регуляторами 1 структури.

Досліджена поведінка регуляторів СТК при великих збуреннях координат режиму СЕП ДСП, які моделювалися ввімкненням ненавантажених пічних агрегатів. Показано, що ефективна компенсація негативного впливу ДСП на мережу можлива тільки при використанні комплексної системи керування режимом роботи СЕП ДСП, яка складається з підсистеми обмеження струмів ввімкнення та підсистеми СТК, регулятор якої обладнаний додатковим контуром стабілізації струму ТРГ за постійною складовою з адаптивним методом зміни його коефіцієнта передачі. Коефіцієнт передачі додаткового контура повинен при великих значеннях постійної складової в струмі вводу зростати до 2, по мірі зменшення постійної складової - зменшуватися до величини, рівній 0,4.

Четвертий розділ роботи присвячений розробці та дослідженню регулятора СТК як підсистеми комплексної системи керування СЕП шахтного навантаження.

Для стабілізації напруги шин 35 кВ п/ст "Нововолинська" Львівської енергосистеми, від яких живиться шахтне навантаження, був встановлений СТК на базі компенсатора типу ТКРМ-20/6 серійного виготовлення. Система регулювання цього компенсатора побудована по схемі без зворотнього зв'язку по напрузі і не може забезпечити необхідну точність підтримання напруги в точці підключення СТК, тому що не реагує на зміну внутрішнього опору енергосистеми та її режиму по напрузі. Це привело до розробки регулятора, який відповідає вимогам стабілізації напруги.

На мал. 4 наведені принципова і структурна схеми СЕП шахтного навантаження з регульованим СТК. Об'єктом керування є система електропостачання СЕП,

параметри режиму \vec{P}_p якої подаються на вхід регулятора P . Параметри \vec{P}_p , по яких здійснюється регулювання в регуляторі P , поступають на функційний перетворювач ФП. На вхід ФП від задаючого елементу ЗЕ поступає уставка \vec{X}_0 . Функційний перетворювач ФП на своєму виході формує напругу регулятора U_p , яка керує роботою системи імпульсно-фазового керування (СІФК) СТК. СІФК формує кут керування α тиристорів СТК. Струм СТК I_5 залежить від α і відповідним чином діє на СЕП. В якості вхідного сигналу регулятора прийняті $\vec{P}_p = (\dot{U}_1, \dot{I}_1)$, де \dot{U}_1, \dot{I}_1 - відповідно напруга і струм вводу II секції шин 35 кВ підстанції. Оскільки регулювання пропонується здійснювати за модулями параметрів $|\dot{U}_1|, |\dot{I}_1|$, задаючий елемент ЗЕ повинен формувати на своєму виході початкові значення модулів параметрів $\vec{X}_0 = |\dot{U}_{10}|, |\dot{I}_{10}|, U_{p0}$, де $|\dot{U}_{10}|, |\dot{I}_{10}| > 0$ - початкові значення по напрузі та струму; U_{p0} - початкове значення напруги регулятора, яке визначає робочу точку СІФК (початковий струм реактора при відсутності збурень за параметрами регулювання).

Для аналізу режиму роботи СЕП шахтного навантаження з СТК була розроблена математична модель

$$\dot{I}_5(\alpha) = -jI_{5max} \cdot f(\alpha) = -j \frac{\sqrt{3}U_{ном}}{\omega L_{рном}} \cdot \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - K_c U_p, \text{ де } K_c = 0,064 \pi \quad (5)$$

$$\Delta U_p = K_U \Delta U_1 - K_I \Delta I_1, \quad (6)$$

$$\text{де } \Delta U_p = U_p - U_{p0} \quad (7)$$

$$\Delta U_1 = U_1 - U_{10} \quad (8)$$

$$\Delta I_1 = I_1 - I_{10} \quad (9)$$

$$U_1 = |\dot{U}_1| \approx E - \sqrt{3} (Im(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) + \dot{I}_5(\alpha)) \cdot X_1 \quad (10)$$

$$I_1 = |\dot{I}_1| = \sqrt{(Re(\dot{I}_3 + \dot{I}_4))^2 + (Im(\dot{I}_3 + \dot{I}_4) + \dot{I}_5(\alpha))^2} \quad (11)$$

Модельовання СТК здійснювалось у вигляді керованого джерела струму (4), яке має в своєму складі регулятор пропорційної дії (6-9) за відхиленнями параметрів регулювання $|\dot{U}_{10}|, |\dot{I}_{10}|$ від заданих початкових значень та систему імпульсно-фазового керування (5). Вплив навантаження підстанції \dot{I}_3, \dot{I}_4 (відповідно сумарне навантаження II с. шин 35 кВ і I с. шин 6 кВ підстанції), режиму роботи СТК

$\dot{I}_5(\alpha)$, параметрів енергосистеми E , X_I на параметри режиму СЕП шахтного навантаження U_I, I_I враховувалося за допомогою рівнянь (10-11).

Записавши рівняння параметрів режиму СЕП з регульованим СТК (10-11) і рівняння прохідної характеристики СІФК (5) для приростів їх аргументів шляхом розкладання в ряд Тейлора, були отримані вирази, які при сумісному рішенні з рівнянням прохідної характеристики регулятора (6), в якому почергово вважалися рівними нулю коефіцієнти неузгодженості по напрузі K_U і струму K_I дозволили отримати кінцеві вирази для визначення коефіцієнтів неузгодженості регулятора

$$K_U = \frac{\Delta E - \Delta U_I - \sqrt{3} X_I (\delta_1 + \delta_2 + Re \dot{I}_{30} \cdot \Delta \varphi_3 + Re \dot{I}_{40} \cdot \Delta \varphi_4)}{\sqrt{3} X_I I_{5max} \frac{2(\cos 2\alpha_0 - 1)}{\pi} \cdot K_c \cdot \Delta U_I}, \quad (12)$$

де $\delta_1 = \Delta I_3 \cdot \sin \varphi_{30}$; $\delta_2 = \Delta I_4 \cdot \sin \varphi_{40}$;

$$Re \dot{I}_{30} = I_{30} \cdot \cos \varphi_{30}; \quad Re \dot{I}_{40} = I_{40} \cdot \cos \varphi_{40}.$$

$$K_I = \frac{A - B}{C}, \quad (13)$$

де $A = I_{10} \cdot \Delta I_I - Re \dot{I}_{10} (\delta_3 + \delta_4 - Im \dot{I}_{30} \cdot \Delta \varphi_3 - Im \dot{I}_{40} \cdot \Delta \varphi_4)$;

$$B = Im \dot{I}_{10} (\delta_1 + \delta_2 + Re \dot{I}_{30} \cdot \Delta \varphi_3 + Re \dot{I}_{40} \cdot \Delta \varphi_4);$$

$$C = Im \dot{I}_{10} \cdot I_{5max} \frac{2(\cos 2\alpha_0 - 1)}{\pi} \cdot K_c \cdot \Delta I_I;$$

$$\delta_3 = \Delta I_3 \cdot \cos \varphi_{30}; \quad \delta_4 = \Delta I_4 \cdot \cos \varphi_{40};$$

$$Im \dot{I}_{30} = I_{30} \cdot \sin \varphi_{30}; \quad Im \dot{I}_{40} = I_{40} \cdot \sin \varphi_{40};$$

$\dot{I}_{10}; \dot{I}_{30}; \varphi_{30}; \dot{I}_{40}; \varphi_{40}$ - початкові значення відповідних координат режиму СЕП.

Вирази (12-13) дають можливість визначити чисельні значення коефіцієнтів передачі регулятора СТК по напрузі і струму для різних режимів збурень СЕП. Застосування для реалізації в регуляторі СТК максимальних з отриманих значень коефіцієнтів передачі дозволяє визначити граничні значення збурень координат режиму СЕП, при яких СТК ще виконує всі регульовальні функції.

На основі прийнятого принципу пропорційного регулювання за відхиленнями напруги та струму розроблена структурна схема регулятора. На базі цієї структурної схеми була розроблена принципова схема регулятора, виконаний розрахунок коефіцієнтів передачі її ланок та виготовлений дослідний взірець регулятора, який пройшов експериментальну перевірку. Експерименти показали, що точність підтримання напруги розробленим регулятором складає 0,49% його уставки і добре співпадає з розрахунковою точністю, рівною 0,48%.

В ході натурних експериментів проводились дослідження динамічних характеристик СТК, обладнаного розробленим регулятором. Динамічні характеристики реєструвалися при стрибкоподібній зміні напруги на вході СІФК

СТК, яка моделювалася ручним відкриттям тиристорно-реакторної групи СТК з подачею в цей момент на вхід СІФК напруги регулятора, який до цього моменту знаходився в роботі. Аналіз результатів показав, що процес регулювання СТК є асимптотичним та стійким.

СТК, обладнаний розробленим регулятором може бути підсистемою комплексної системи керування режимом роботи СЕП шахтного навантаження, до якої входить також підсистема регулювання напруги за допомогою РПН трансформатора живлення. Таке поєднання підсистем в комплексну систему дозволяє значно зменшити встановлену потужність СТК за рахунок того, що діапазон регулювання напруги СТК повинен дорівнювати лише величині ступеня РПН трансформатора живлення. Підсистема РПН трансформатора живлення здійснює зустрічне регулювання відхилень напруги, а підсистема СТК здійснює швидкодіючу стабілізацію напруги.

ВИСНОВКИ

1. Розроблений алгоритм керування та структурна схема комплексної системи керування режимом роботи СЕП ДСП, що складається з підсистеми обмеження КСН та підсистеми СТК з регулятором, побудованим за розімкненим принципом регулювання, і яка дозволяє ефективно компенсувати вплив ДСП на мережу живлення у всіх режимах роботи печі при зменшеній, в порівнянні з автономним режимом, потужності СТК.

2. Розроблені алгоритми керування та структурні схеми окремих підсистем комплексної системи керування режимом роботи СЕП ДСП, які дозволяють підвищити ефективність функціонування комплексної системи у всіх режимах роботи печі.

3. Запропонований, для підсистеми обмеження КСН, в якості основного методу обмеження струмів ввімкнення, спосіб пофазної комутації пічного вимикача, в якості допоміжного (при необхідності, для надпотужних ЛЕП) - спосіб дискретного підвищення напруги живлення на ввіді пічного агрегату. Застосування вказаних методів дозволяє обмежити величину КСН в обмотках трансформатора мережі СЕП ДСП до допустимого рівня.

4. Встановлено, що в складі ємнісної ланки підсистеми СТК, призначеної для роботи в СЕП ДСП, для запобігання резонансу на частоті 2-ї гармоніки, який виникає при завантаженні СЕП кидками струмів намагнічення, повинен бути фільтр 2-ї гармоніки.

5. Запропонована методика порівняння ефективності роботи регуляторів СТК, критерієм якої є зменшення коливань напруги в точці підключення компенсатора.

6. Доведено, що за критерієм зменшення коливань напруги в підсистемі СТК доцільно застосовувати регулятор, який базується на непрямому методі вимірювання параметрів режиму ємнісної ланки СТК, використовує, в якості алгоритму керування,

рівняння компенсації у формі реактивних складових струму навантаження та обладнаний інтегральними давачами струму.

7. Доведено, що підсистема СТК повинна бути обладнана контуром стабілізації струму ТРГ за постійною складовою з адаптивним методом зміни коефіцієнта передачі, що дозволяє ефективно компенсувати вплив залишкових, після дії підсистеми обмеження КСН, струмів ввімкнення на мережу живлення.

8. Розроблений алгоритм керування та структурна схема комплексної системи керування СЕП шахтного навантаження, яка складається з підсистеми РПН трансформатора живлення та підсистеми СТК з регулятором, побудованим за замкненим принципом регулювання (регулятор пропорційної дії за відхиленнями по напрузі та струму) і дозволяє зменшити встановлену потужність підсистеми СТК за рахунок передачі частини регулюючих функцій підсистемі РПН трансформатора підстанції.

Основний зміст дисертаційної роботи викладений в публікаціях:

1. Енин В.Г., Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е. Экономическое обоснование применения статических регулируемых ИРМ в электрических сетях. - Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Электрические сети и системы", № 16, Киев, "Вища школа", 1979, с.35-39.

2. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Принципы построения быстродействующего регулятора для статического тиристорного компенсатора. - Вестник Львовского политехнического института "Электроэнергетические и электромеханические системы", № 194, Львов, Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те., 1985, с. 22-25.

3. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Датчики параметров регулирования статических тиристорных компенсаторов. - Вестник Львовского политехнического института "Электроэнергетические и электромеханические системы", № 204, Львов, Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те., 1986, с. 10.

4. Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А., Гапанович В.Г. Быстродействующая фазная компенсация несимметричных нагрузок статическими компенсаторами. - Техническая электродинамика, № 3, 1987, Киев, Наукова думка, с. 51-57.

5. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Помехоустойчивость быстродействующих датчиков для регуляторов статических компенсаторов. - Техническая электродинамика, № 4, 1987, Киев, Наукова думка, с. 55-59.

6. Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А., Гапанович В.Г. Влияние несимметрии режима электродуговой печи на параметры компенсирующего устройства. - "Электрические сети и системы", № 23, 1987, Киев, Вища школа, с. 120-126.

7. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А., Жураховский А.В., Стряпан В.Н. Исследование бросков токов намагничивания в системе электроснабжения сверхмощной дуговой сталеплавильной печи. - Техническая электродинамика, № 2, 1990, Киев, Наукова думка, с. 38-43.

8. Амброз В.М., Гапанович В.Г., Малиновский А.А., Мельник В.И. Регулирование коэффициента мощности в статическом тиристорном компенсаторе реактивной мощности. - Вестник Львовского политехнического института "Электроэнергетические и электромеханические системы", № 253, Львов: Вища школа. Изд-во при Львовском ун-те, 1991, с. 3-5.

9. Сидоров В.С., Амброз В.М., Гапанович В.Г., Кондор И.В. Исследование переходных процессов в статическом регулируемом вентильном источнике реактивной мощности. - Техническая электродинамика, № 4, 1992, Киев, Наукова думка, с. 39-44.

10. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Разработка быстродействующих регуляторов статических тиристорных компенсаторов. - В сб. "Современные проблемы энергетики". Тез. докл. и сообщений IV Республиканской научно-технической конференции, Киев, 1985, с. 55-57.

11. Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е. Принципы построения быстродействующих датчиков системы регулирования статических тиристорных компенсаторов. - Труды Республиканской школы-семинара молодых ученых и специалистов "Преобразовательная техника в электроэнергетических, технологических установках и электроприводах", 1987, Львов, № 1160-В88 от 10.02.88 г. с. 130-136.

12. Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А. Интегральный датчик для системы регулирования статического тиристорного компенсатора. - Тез. докл. III Республ. научн.-техн. конф. "Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике", Харьков, 1988, с. 53.

13. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Исследование бросков токов намагничивания в системе электроснабжения дуговой электропечи ДСП-100НЗА. - Тезисы докладов I Всесоюзного научно-технического симпозиума "Электроснабжение и электрооборудование дуговых электропечей", Тбилиси, 1988, с. 54-55.

14. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Жураховский А.В., Кенс Ю.А., Разработка и исследование регулятора статического тиристорного компенсатора для подстанции общего назначения. - Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Создание и применение тиристорных преобразователей соизмеримой мощности", Харьков, 1990.

15. Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А., Гапанович В.Г. Система электроснабжения. Авторское свидетельство № 1198646 (СССР).

16. Кенс Ю.А., Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е. Быстродействующий датчик составляющих тока. Авторское свидетельство № 1205039 (СССР).

17. Кенс Ю.А., Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е. Датчик активного тока. Авторское свидетельство № 1385083 (СССР).

18. Кенс Ю.А., Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е., Сегада М.С., Харченко В.А., Дрогин В.И., Татаров А.П., Курлыкин В.И. Система электроснабжения дуговой сталеплавильной печи. Авторское свидетельство № 1559438 (СССР).

19. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А., Стряпан В.Н., Харченко В.А., Татаров А.П., Дрогин В.И., Курлыкин В.И. Способ управления системой электроснабжения дуговой сталеплавильной печи. Авторское свидетельство № 1614139 (СССР).

20. Гапанович В.Г., Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А., Равлик А.М., Дрогин В.И., Курлыкин В.И., Татаров А.П. Система электроснабжения дуговой сталеплавильной печи. Авторское свидетельство № 1649687 (СССР).

21. Варецкий Ю.О., Кенс Ю.А., Гапанович В.Г. Система регулирования статичного тиристорного компенсатора. Патент України № 2293.

22. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Система регулирования статического тиристорного компенсатора. Патент Российской Федерации № 2015602.

Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані в співавторстві, полягає в наступному: розробці окремих алгоритмів керування, структурних та принципових схем підсистеми СТК [2, 3, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 21, 22] та підсистеми обмеження КСН [15, 18-20] комплексної системи керування СЕП ЗН; виборі методу досліджень для виводу рівнянь компенсації [4]; виборі методики визначення симетруючої потужності компенсатора [6]; розробці методів вимірювання параметрів регулювання СР СТК [11]; проведенні розрахунків по економічному обґрунтуванню застосування джерел реактивної потужності в електричних мережах та їх аналізі [11]; дослідженні завадостійкості давачів різних типів, аналізі отриманих результатів [5]; дослідженні КСН в СЕП ДСП, аналізі отриманих результатів [7]; створенні фізичної моделі, проведенні лабораторних досліджень [9]; узагальненні результатів досліджень КСН в СЕП ДСП [13].

В. Микола

ABSTRACT

Гапанович В.Г. Development and research complex control systems applied to power supply systems for variable load.

Presents in PhD dissertation on the specialization 05.14.02 - Electrical stations (electrical part), networks, electric power systems and their control. The Azov State Technical University - Mariupol, 1996.

22 works are protected the works content the results of control algorithms working out for separate subsystems structural diagrams and complex control system applied to power supply system for variable load. Methods of comparison for static thyristor compensator controllers efficiency are proposed. Required range of transmission factor change for stabilization loop of thyristor-reactor group current considering direct component for all performances of are furnace power supply systems in defined. The techniques for calculation of misalignment factors applied to voltage and current of static thyristor compensator subsystem consisting proportional type controller are worked out.

АННОТАЦІЯ

Гапанович В.Г. Разработка и исследование комплексных систем управления режимами работы систем электроснабжения переменной нагрузки.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - Электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими. Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, 1996.

Защищаются 22 научные работы, которые содержат результаты разработки алгоритмов управления структурных схем отдельных подсистем и комплексной системы управления, режимом работы системы электроснабжения переменной нагрузки в целом. Предложена методика сравнения эффективности работы регуляторов статических тиристорных компенсаторов. Определен необходимый диапазон изменения коэффициента передачи контура стабилизации тока тиристорно-реакторной группы компенсатора по постоянной составляющей для всех режимов работы системы электроснабжения дуговой печи. Разработана методика выбора коэффициентов рассогласования по напряжению и току для подсистемы статического тиристорного компенсатора с регулятором пропорционального действия.

Ключові слова. СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, КОМПЛЕКСНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, СТАТИЧНІ ТИРИСТОРНІ КОМПЕНСАТОРИ, СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ.

Літв. до друку 19.09.96. Формат 60x84¹/₁₆
Львів, друк. 2 Січ. друк. Умови друк. арк. 1, 23
Умов. арк. - 1, 23. Умови-видат. арк. 1, 17
Тираж 100 прим. Зам. 330. Безплатно

ДУП 290340 Львів-ІЗ, Ст.Бандери, 12

Дільниця опрацювання друку ДУП
Львів, вул. Героївська, 266

40390¹⁷

AB 44 846
AB 44.846