ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису

ШПОЛЯНСЬКИЙ Олег Григорович

УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В ТЕМПІ ПРОЦЕСУ

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

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ 1997

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки Національної академії наук України, м.Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, член-кор. НАН України Кузнєцов Володимир Григорович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук. професор Зорін Владлен Володимирович

кандидат технічних наук, с.н.с. Буткевич Олександр Федотович

Провідна організація: Науково-інженерний центр "Енергомережа" Міненерго України, м. Київ

Захист відбудеться 1 липня 1997 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.98.04 при Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 252680, м. Київ-57, пр. Перемоги 56.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України.

Автореферат розіслано "27" травня 1997 р.

Вчений секретер
спеціалізованої вченої ради Титко О.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи та ступінь дослідження тематики дисертації. Розподільчі електричні мережі (РЕМ) є тією ланкою енергосистеми, яка безпосередньо з'єднує споживачів електроенергії з її постачальниками. Розподільчі мережі у великій мірі визначають надійність енергопостачання та ефективність функціонування енергосистем у цілому. Швидкий розвиток мікропроцесорної техніки, який спостерігається в останні роки, насичення підприємств електричних мереж достатньо потужними ПЕОМ, розвиток методів і засобів передачі інформації зробили можливим побудову гнучких і надійних систем управління режимами розподільчих електричних мереж в темпі процесу. Вочевидь, що моделі і методи, які застосовувались для планування режимів розподільчих мереж і в яких робились чисельні спрощуючі допущення, не можуть бути ефективно використані для розв'язання задач оперативного управління. Неможлива безпосередня реалізація методів, які застосовуються в живлячих мережах. Все це робить актуальним розробку моделей, методів оцінювання стану і оптимального управління режимами розподільчих електричних мереж напругою 6-35 кВ в темпі процесу на основі існуючої інформації.

Метою цієї дисертації є розробка і розвиток методів оптимального управління режимами розподільчих електричних мереж в темпі процесу.

Основні завдання роботи:

1. Розробка моделі режиму РЕМ, яка базується на інформації, що реально існує і дозволяє врахувати невизначеність навантажень.

2. Розробка методів підвищення достовірності телевимірів (ТВ) і уточнення навантажень трансформаторних підстанцій (ТП).

3. Розробка методу корекції навантажень ТП, їх добових графіків (ДГ) на основі аналізу ретроспективи оцінених значень навантажень.

4. Розробка методу централізованого управління батареями конденсаторів (БК), оптимізації напруги і реактивної потужності та комплексної оптимізації режимів РЕМ.

5. Розробка алгоритмів і програм оцінювання стану, аналізу і оптимізації режимів РЕМ.

Теоретична і практична цінність дисертації полягає розробці і реалізації моделей і методів, які спрямовані на вирішення комплексу питань управління режимами РЕМ в темпі процесу. А саме: модель режиму РЕМ; методи і алгоритми оцінювання стану, уточнення навантажень і добових графіків; методи і алгоритми оптимального управління режимами РЕМ. На їх основі розроблено комплекс програм, використання якого підвищить економічність та надійність

електропостачання.

Наукова новизна дисертаційної роботи.

1. Розроблено модель розподільчої електричної мережі, яка на відміну від існуючих моделей враховує: в схемах заміщення обладнання активні і реактивні складові опорів і провідностей, пристрої з автоматичними регуляторами; неповноту вихідної інформації про навантаження, яка відтворюється у вигляді нечіткого числа (НЧ), де кількістним значенням є комплекс току, а мірою його невизначеності - функція належності (ФН).

2. Запропоновано та обгрунтовано спосіб представлення телевимірів нечіткими числами (L-R)-типу, що дозволяє коректно враховувати недостовірність вимірів, які виконуються один раз.

3. Розроблено метод оцінювання стану РЕМ, який основано на теорії нечітких множин(ТМН) і топологічному аналізі схеми. Він, на відміну від існуючих методів, дозволяє визначити ступень достовірності вимірів, провести їх балансування і уточнити значення навантажень ТП за умов відсутності стохастичних характеристик ТВ.

4. Розроблено метод аналізу ретроспективи оцінених значень навантажень ТП. Він дозволяє уточнювати значення навантажень, коефіцієнтів завантаження ДГ та відповідних значень ФН.

5. Розроблено методи управління режимами РЕМ, які реалізують: централізоване управління БК; оптимізацію реактивної потужності і напруги; комплексну оптимізацію конфігурації РЕМ, реактивної потужності БК та напруги трансформаторів центрів живлення (ЦЖ). Показана більша ефективність цих методів, порівняно з відомими, при управлінні режимами РЕМ з метою зниженя втрат потужності і енергії.

Реалізація роботи. На основі запропонованих в дисертації методів і алгоритмів розроблено програмні засоби, які впроваджено на ряді енергопідприємств України і колишнього СРСР. Серед них Підприємство київських кабельних мереж ВЕО "Київенерго", ПТП "Оргкомуненерго" РФ, "Латглавенерго", РЕУ "Гродноенерго", Уманське ПЕМ, Житомирське Західне ПЕМ.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: Всесоюзному семінарі "Качество энергии и электромагнитная совместимость" (Москва 1988 р.), Всесоюзній науково-практичній конференції "Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении" (Іваново 1989 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта" (Дніпропетровськ 1990 р.), Всесоюзній науково-технічній

конференції "Диагностика электроэнергетического оборудования с использованием микропроцессорных средств" (Київ 1990 р.), VI Республіканській школі-семінарі молодих вчених і спеціалістів (Алушта 1991 р.), виставці-семінарі "Технология информационных локальных и распределительных сетей в энергетике" (Київ 1994 р.), Міжнародній науково-практичній конференції " Эффективность систем электроэнергетики" (Київ 1996 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 друкованих наукових праць і 4 звіти по темам ДКНТ.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з введення, чотирьох розділів і заключення, які викладені на 162 друкованих сторінках та включає 12 рисунків і 13 таблиць на 21 сторінці, списку літератури із 115 найменувань і 4 додатків.

Конкретний особистий внесок дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист:

1. Модель режиму РЕМ.

2. Методи і алгоритми оцінювання стану РЕМ за даними ТВ.

3. Метод і алгоритм обробки результатів оцінювання з метою уточнення навантажень ТП, їх добових графіків та значень ФН.

4. Методи і алгоритми управління реактивною потужністю БК, напругою трансформаторів центрів живлення і станом комутаційної апаратури в темпі зміни режиму з метою зниження технологічних витрат енергії в РЕМ.

Предмет та об'єкт досліджень. В дисертації досліджуються розподільчі електричні мережі, моделі їх режимів, методи оцінювання стану та оптимального управління в темпі процесу.

Методи досліджень. Дослідження спираються на методологію системного аналізу і використовують методи математичного моделювання, теорію нечітких множин, теорію графів, елементи теорії імовірності, градієнтні методи оптимізації.

Основний зміст роботи.

В першому розділі проводиться аналіз існуючих моделей РЕМ. Він показав, що спрощуючі припущення, які застосовуються в моделях при плануванні режимів, стають некоректними при управлінні ними в темпі процесу. З метою уточнення моделі РЕМ напругою 6-35 кВ були використані такі схеми заміщення. Лінії відтворювались П-образною схемою заміщення. Враховувались активні і реактивні складові опору і реактивна провідність. Двообмоточні трансформатори відтворювались Г-образною схемою заміщення. Вона враховувала активну і реактивну складові опору і провідності. Реактивна потужність БК моделювалась провідністю. Зміна параметрів обладнання, на якому встановлено

автоматичні регулятори, враховувалась шляхом моделювання законів їх управління.

В роботі показано, що представлення поточного навантаження струмом для мереж 6-35 кВ є інформаційно найбільш забезпеченим. Необхідно при цьому враховувати кут зсуву фаз, який для різних споживачів може змінюватись у досить широких межах. Міра невизначеності навантажень задається за допомогою теорії нечітких множин. Функція належності $\mu_A(x)$ є вичерпною характеристикою нечіткої множини (НМ) $A=\{(x, \mu_A(x))\}$. Належність елемента множині визначає число з інтервалу [0,1]. У відомих наукових працях запропоновано методи побудови ФН для навантажень і добових графіків за інформацією із різних джерел. Але представлення навантаження НМ через значне зростання об'ємів інформації суттєво ускладнює аналіз режиму. Тому в роботі запропоновано перейти від НМ до нечітких чисел і вибрати із НМ $(I,\mu(I))$ таке значення струму, для якого

$$\mu(I)= \sup(\mu(I_i)). \qquad (1)$$

Таким же чином формуються індивідуальні ДГ навантажень. Кожній годині доби t відповідає пара чисел $(k_t,\mu_k(k_t))$, де k_t - коефіцієнт завантаження у відносних одиницях, $\mu_k(k_t)$ - значення його ФН. У розрахунках приймають участь тільки кількістні значення навантажень і коефіцієнтів завантаження ДГ. Відповідні значення ФН використовуються лише при оцінюванні стану і корекції ДГ.

Режим розраховується таким чином.

1. У вузлах мережі встановлюється значення напруги, яке дорівнює виміру на шинах відповідного ЦЖ.

2. Розраховуються струми провідностей вузлів і БК.

3. По струмах навантажень, провідностей і БК визначається струморозподіл.

4. По напрузі ЦЖ і струморозподілу уточнюються значення напруги у вузлах мережі.

5. Збіжність процесу контролюється по напрузі. Якщо

$$\max(|U_i^{(k)}+U_i^{(k+1)}|)<\varepsilon, \qquad (2)$$

де $U_i^{(k)}$ - напруга в i-му вузлі на k-ій ітерації; $U_i^{(k+1)}$ - напруга в i-му вузлі на ітерації k+1; ε - межа збіжності ($\varepsilon>0$), розрахунок зупиняється. Інакше, зворот до п.2.

На основі описаної моделі режиму РЕМ було складено програму і проведено серію розрахунків реальних схем. Вони показали повну відповідність моделі задачам управління РЕМ в темпі процесу.

<u>Другий розділ</u> присвячено оцінюванню стану режиму РЕМ. Головними

етапами оцінювання стану є пошук помилкових телевимірів (підвищення достовірності); балансування ТВ ЦЖ, живлячих ліній (ЖЛ) і головних участків(ГУ); корегування струмів навантажень.

Для розв'язання задачі оцінювання стану в РЕМ розроблено метод на основі топологічного аналізу схеми з урахуванням нечіткого характеру інформації про навантаження. Інформація про ТВ і навантаження зводиться до одного типу. Для цього ТВ представляються у вигляді нечіткого унімодального числа (L-R)-типу. НЧ A є нечітким унімодальним числом (L-R)-типу тоді і тільки тоді, коли

$$\begin{cases} \mu_A(x)=L((a-x)/\alpha) & \forall x\leqslant a,\ \alpha>0 \\ \mu_A(x)=R((x-a)/\beta) & \forall x\leqslant a,\ \beta>0 \end{cases}, \qquad (3)$$

де a - середнє значення (мода) НЧ; α и β - лівий і правий коефіцієнти нечіткості.

У нашому випадку модою НЧ буде значення ТВ A_n, а коефіцієнтами нечіткості - довірча похибка виміру u. Тоді значення виміру вожна записати у вигляді (A_n,u,u).

Пропонується такий алгоритм оцінювання режиму РЕМ.

1. По даним телесигналів (ТС) и псевдосигналів (ПС) корегується адресна модель мережі.

2. По вимірам U ЦЖ і навантаженням ТП, спрогнозованим по добовим графікам, розраховується режим РЕМ.

3. Для ЦЖ, ЖЛ і ГУ за даними ТВ і розрахунків визначаються активні I'_i і реактивні I''_i складові струмів ліній як непрямі виміри. Знаходяться відповідні їм довірчі похибки $\Delta I'_i$ і $\Delta I''_i$.

4. Складові струмів записуються у вигляді НЧ (L-R)-типу: $\mathcal{I}'_i=(I'_i,\Delta I'_i,\Delta I'_i)$ і $\mathcal{I}''_i=(I''_i,\Delta I''_i,\Delta I''_i)$ відповідно. Знаходяться суми струмів $\mathcal{I}'_\Sigma$ и $\mathcal{I}''_\Sigma$ ліній, які живляться від k-го вузла.

5. Перевіряється, чи є помилкові дані в ТВ вузлів « шини ЦЖ ». Можливі три випадки.

а) ТВ достовірні (грубі похибки відсутні), якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} \max[\mu(\mathcal{I}'_\Sigma)\cap\mu(\mathcal{I}'_j)]\geqslant 0{,}5; \\ \max[\mu(\mathcal{I}''_\Sigma)\cap\mu(\mathcal{I}''_j)]\geqslant 0{,}5, \end{cases} \qquad (4)$$

де $\mathcal{I}'_j$ і $\mathcal{I}''_j$ - складові струму лінії, яка живить k-ий вузол.

б) ТВ недостовірні (є грубі похибки), якщо:

$$\begin{cases} \mu(\mathcal{I}'_\Sigma)\cap\mu(\mathcal{I}'_j)=\varnothing; \\ \mu(\mathcal{I}''_\Sigma)\cap\mu(\mathcal{I}''_j)=\varnothing, \end{cases} \qquad (5)$$

в) у випадку, коли:

$$\begin{cases} 0< \max[\mu(I'_{\Sigma}) \cap \mu(I'_j)] < 0{,}5; \\ 0< \max[\mu(I''_{\Sigma}) \cap \mu(I''_j)] < 0{,}5, \end{cases} \qquad (6)$$

вважається, що виміри сумнівні. У разі, коли для активної і реактивної складових струмів жодна з умов (4-6) одночасно не виконується, виміри вважаються також сумнівними.

6. Якщо умови (4) не виконуються, робиться топологічний аналіз вузла з порушеннями. У відповідності до п.п. 3-5 провіряється баланс струмів на шинах розподільчих пунктів (РП). Якщо для всіх РП умови (4) виконуються, тоді ТВ ЦЖ помилкові. В іншому випадку ТВ ліній, які не відповідають умовам (4) будуть помилковими або сумнівними. Помилкові ТВ заміняються псевдовимірами (ПВ) або проводиться нове опитування датчиків. Сумнівні ТВ коригуються.

7. Визначаються складові небалансу струмів k-го вузла $\delta I'_k$ і $\delta I''_k$, як різниця між достовірними і сумнівними вимірами.

8. Знаходиться ваговий коефіцієнт, як доповнення до ФН

$$\bar{\mu}(I'_{ik})=1-\max[\mu(I'_{\Sigma}) \cap \mu(I'_i)]; \quad \bar{\mu}(I''_{ik})=1-\max[\mu(I''_{\Sigma}) \cap \mu(I''_i)]. \qquad (7)$$

9. Розраховуються поправки до відповідних струмів k-го вузлу

$$\delta I'_i=\frac{\delta I'_k \ \bar{\mu}(I'_{ik})I'_{ic}}{\sum\limits_{i=1}^{n} I'_{ic} \ \bar{\mu}(I'_{ik})}; \quad \delta I''_i=\frac{\delta I''_k \ \bar{\mu}(I''_{ik})I''_{ic}}{\sum\limits_{i=1}^{n} I''_{ic} \ \bar{\mu}(I''_{ik})}, \qquad (8)$$

де n - кількість ліній з сумнівними вимірами.

10. Уточнюється активна і реактивна складові струмів

$$I'^{y}_i=I'_{ic}+\delta I'_i; \quad I''^{y}_i=I''_{ic}+\delta I''_i. \qquad (9)$$

11. Знаходяться поправки для струмів ТП, які живляться від m-го ГУ. Ваговим коефіцієнтом буде доповнення до ФН навантаження.

$$\delta I'_j=\frac{\delta I'_m \ \bar{\mu}(I'_j)I'_j}{\sum\limits_{i=1}^{n} I'_i \ \bar{\mu}(I'_j)}; \quad \delta I''_j=\frac{\delta I''_m \ \bar{\mu}(I''_j)I''_j}{\sum\limits_{i=1}^{n} I''_i \ \bar{\mu}(I''_j)}, \qquad (10)$$

12. Уточнюються струми ТП

$$\dot{I}^{y}_j=\dot{I}_j+\delta\dot{I}_j. \qquad (11)$$

При необхідності уточнені значення струмів обмежуються.

Накопичення результатів оцінювання дає змогу уточнювати ДГ навантажень. Алгоритм уточнення має такий вигляд.

1. Після проведення m оцінювань для i-го ТП розраховується середнє значення оцінених токів навантажень кожної години доби t

$$I^t_{ai} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^{m} I^t_{li} . \qquad (12)$$

2. Розглядаються попарно всі ступені ДГ. Для кожної пари g і h визначається взаємна відповідність коефіцієнтів завантаження k^g_i, k^h_i і уточнених значень навантажень I^h_{ai}, I^g_{ai}

$$\xi^{gh}_i = \frac{I^g_{ai} / k^g_i}{I^h_{ai} / k^h_i} . \qquad (13)$$

3. Визначається індекс зміни μ^g_i

$$d^{gh}_i = \begin{cases} -1, & |1-\xi^{gh}_i| > \max(\bar{\mu}^g_i, \bar{\mu}^h_i); \\ 0, & \min(\bar{\mu}^g_i, \bar{\mu}^h_i) \leq |1-\xi^{gh}_i| \leq \max(\bar{\mu}^g_i, \bar{\mu}^h_i); \\ 1, & |1-\xi^{gh}_i| < \min(\bar{\mu}^g_i, \bar{\mu}^h_i). \end{cases} \qquad (14)$$

4. Знаходиться інтегральний індекс зміни μ^g_i

$$d^g_i = \sum d^{gh}_i , \quad h=\overline{1,24} , \quad h \neq g. \qquad (15)$$

5. Проводиться аналіз значення d^g_i. Можливі три випадки:

а) якщо $d^g_i < 0$, параметри ступені g не узгоджуються з параметрам всього ДГ. Тоді корегуються μ^g_i і k^g_i

$$\mu^{g\prime}_i = \frac{1}{2}\left[\mu^g_i + 1 - \frac{\sum^{H} |1-\xi^{gh}_i|}{n}\right]; \qquad (16)$$

$$k^{g\prime}_i = k^g_i \sqrt[2n]{\prod^{H} \xi^{gh}_i} , \qquad (17)$$

де для $\forall h \in H$ $d^{gh}_i = -1$; n - кількість елементів в H.

б) якщо $d^g_i = 0$, параметри ступені g в цілому узгоджуються з параметрам всього ДГ. Корегувати μ^g_i і k^g_i непотрібно.

в) якщо $d^g_i > 0$, параметри ступені g добре узгоджуються з параметрам всього ДГ. Збільшується ФН μ^g_i при збереженні значення k^g_i

$$\mu^{g\prime}_i = \frac{1}{2}\left[\mu^g_i + 1 - \frac{\sum^{H} |1-\xi^{gh}_i|}{n}\right], \qquad (18)$$

де для $\forall h \in H$ $d^{gh}_i = 1$; n - кількість елементів в H.

На основі запропонованих методів і алгоритмів були розроблені

програми оцінювання стану і корекції ДГ. Проведено розрахунки на фрагменті схеми, який складався з 1 ЦЖ, 35 ліній і 23 ТП. Кожен ТП мав індивідуальний ДГ навантаження. Для кожної години доби розраховувався режим. Отримані значення струмів ЦЖ, ЖЛ і ГУ були прийняті як еталонні ($I_э$). Потім ДГ були змінені. Для кожної ступені ДГ всіх ТП були визначені ФН. Їх значення залежали від ступеню спотворення коефіцієнтів завантаження. Для кожної години доби проводилось 10 оцінювань стану, а після цього коригування ДГ. Було проведено 7 таких розрахунків. Виміри ЦЖ, ЖЛ і ГУ визначались як $I_з = I_э + 0{,}05k$, де k - випадковий коефіцієнт з нормальним законом розподілу, який знаходився у межах від -1 до +1. Для кожного ТП визначались абсолютні значення відхилень спотвореного ДГ від еталонного - Δ, їх сума - $\Delta\Sigma$ і максимальне відхилення - Δ_{max}. Вихідне значення $\Delta\Sigma$ для різних ТП коливалось від 0,0 (ДГ без спотворень) до 1,0, а Δ_{max} - від 0,0 до 0,44. По закінченню всіх розрахунків $\Delta\Sigma$ коливалось у межах 0,08 - 0,692, а Δ_{max} - 0,025 - 0,229. Зменьшення $\Delta\Sigma$ відбулося для 19 ТП, а Δ_{max} - для 18. У цілому по схемі $\Delta\Sigma$ знизилось з 12,85 до 7,146. Найбільший ефект отримано після перших чотирьох розрахунків ($\Delta\Sigma$ схеми 7,244). Подальше зниження ефективності пояснюється необхідністю провести додаткові виміри навантажень. Перш за все це стосується тих ТП і годин доби, для яких μ_i^t найменьше.

<u>Третій розділ</u> присвячено розробці методів оптимального управління режимами РЕМ.

Батареї конденсаторів є ефективним засобом управління режимами РЕМ. Але методи, які існують, не дозволяють використовувати їх в повній мірі. Тому було розроблено метод централізованої оптимізації БК з метою зниження втрат активної потужності РЕМ.

Втрати потужності П можна записати у вигляді

$$П = \sum_{i}^{NT} g_i \left[\left(U_ц' + \sqrt{3} \sum_{l}^{L} (I_l'' x_l - I_l' r_l)\right)^2 + \left(U_ц'' - \sqrt{3} \sum_{l}^{L} (I_l' x_l + I_l'' r_l)\right)^2 \right] +$$

$$+ 3 \sum_{j=1}^{NL} I_j^2 r_j + 3 \sum_{i=1}^{NT} I_i^2 r_{Ti}, \qquad (19)$$

де $U_ц'$ і $U_ц''$ - складові напруги ЦЖ; I_l', I_l'', r_l, x_l - складові струму і опору l-ї лінії; g_i - провідність i-го ТП, яка відповідає втратам в сталі; L - множина ліній, по яким тече струм i-го ТП ($l \in L$); I_j і r_j - модуль струму і активна складова опору j-ї лінії; I_i і r_{Ti} - модуль струму і активна складова опору i-го ТП; NL і NT - кількість ліній і ТП відповідно.

Для знаходження умов мінімуму втрат застосуєм градієнтний

метод. В цьому методі на шляху до оптімуму переміщення із точки простору $X^{(k)}$ в точку $X^{(k+1)}$ виконуються у напрямку антиградієнта

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \lambda^{(k)} g(X^{(k)}), \tag{20}$$

де $g(X^{(k)})$ - градієнт; $\lambda^{(k)}$ - довжина шагу.
Визначимо частинні похідні втрат по струму БК.

$$\frac{\partial П}{\partial I_k} = 2[\sum_i^{NT} g_i [(U'_u + \sqrt{3}\sum_l^L (I''_l x'_l - I'_l r'_l))\sqrt{3}\sum_{lk} x_{lk} +$$

$$+(U''_u - \sqrt{3}\sum_l^L (I'_l x'_l + I''_l r'_l))\sqrt{3}\sum_{lk} r_{lk}]] + 6\sum_j^{NL} I_{jk} r_{jk} + 6\sum_{i=1}^{NT} I_{ik} r_{Tik}, \tag{21}$$

де I_k - струм k-і БК, $k \in K$ - множина батарей конденсаторів; r_{Tik} - активний опір і-го ТП, по якому тече струм k-і БК; r_{lk} і x_{lk} - складові опору лінії lk. lk - індекс лінії, по якій одночасно течуть сткуми і-го ТП і k-і БК.

Другі частинні похідні, з яких складається матриця Гессе G(X), будуть мати вигляд

$$\frac{\partial^2 П}{\partial I_k \partial I_n} = 6\sum_i g_i [\sum_{lk} x_{lk} \sum_{ln} x_{ln} + \sum_{lk} r_{lk} \sum_{ln} r_{ln}] + 6\sum_{kn} r_{kn}; \tag{22}$$

$$\frac{\partial^2 П}{\partial I_k^2} = 6\sum_i g_i [(\sum_{lk} x_{lk})^2 + (\sum_{lk} r_{lk})^2] + 6\sum_k r_k, \tag{23}$$

де r_{ln} і x_{ln} - активний і реактивний опір лінії ln; ln - індекс лінії, по якій одночасно течуть струми і-го ТП і n-і БК; r_{kn} - активний опір лінії kn; kn - індекс лінії, по якій одночасно течуть струми k-і і n-і БК.
Складові матриці Гессе не залежать від струмів БК і визначаються один раз. Оптимальний коефіцієнт шагу знаходиться за формулою

$$\lambda^{(k)} = \frac{g^T(X^{(k)}) g(X^{(k)})}{g^T(X^{(k)}) G(X)^{(k)} g(X^{(k)})} \tag{24}$$

На основі запропонованого методу було розроблоно програму централізованої оптимізації реактивних потужностей БК. За даними схеми, яка складалась з 1 ЦЖ, 161 лінії, 88 ТП, 14 БК потужністю від 50 до 290 кВАр (загальна потужність 2120 кВАр), проведено два розрахунки: компенсація реактивної складової навантаження у вузлах з БК і централізована оптимізація. Вони виконувалися для кожної години доби при напрузі ЦЖ 10,6 кВ. Втрати потужності в режимі мінімальних навантажень при централізованій оптимізації по відношенню до

компенсації знизились на 5,96 кВт (5,6%), в режимі максимальних навантажень - на 17,57 кВт (4,8%), за добу - на 319,15 кВтг (6,3%). Знизилось споживання електроенергії, завантаження ліній.

Сумісне управління реактивною потужністю і напругою більш ефективне. Відхилення напруги від стандарту можна врахувати за допомогою штрафної функції, яка у найпростішому випадку матиме вигляд:

$$F(X)=\begin{cases} \sum (V_i-V_i^{min})P_i, & \text{при } V_i-V_i^{min}<0; \\ 0, & \text{при } V_i^{min}<V_i<V_i^{max}; \\ \sum_i (V_i-V_i^{max})P_i, & \text{при } V_i-V_i^{max}>0, \end{cases} \qquad (25)$$

де V_i, V_i^{min}, V_i^{max} - відхилення напруги та її мінімальна і максимальна межі в і-му вузлі; P_i - потужність в і-му вузлі.
Оптимізація функції $L(X)=\Pi+F(X)$ також виконується градієнтним методом. За наведеними вище даними було проведено два розрахунки. У першому компенсувалась реактивна потужність і потім визначалась оптимальна напруга ЦЖ. У другому проводилась сумісна оптимізація реактивної потужності БК і напруги ЦЖ. Для всіх ТП межі відхилення напруги становили V_i^{min}=2,5% і V_i^{max}=5%. У другому розрахунку, порівняно з першим, зниження втрат за добу склало 387,1 кВтг (7,1%), споживання 234,78 кВтг (0,21%). А зменьшення втрат і споживання відносно централізованої оптимізації реактивної потужності без управляння напругою склали 126,77 кВтг і 3023,53 кВтг, або 2,74%. Тобто, зменьшення втрат і споживання відбувається за рахунок зниження напруги ЦЖ. Погіршення якості напруги не відбулося.

Перемикання в РЕМ призводять до перерозподілу активних і реактивних навантажень між джерелами живлення. Зміна опорів шляхів, по яким течуть навантаження, призводить до зниження втрат. Але, якщо в мережі є БК, які увімкнуті не на повну потужність, подальший перерозподіл навантажень може призвести до зниження втрат за рахунок збільшення ступеню компенсації реактивної складової потужності, яка була перерозподілена. Ще одна можливість поліпшення режиму - перемикання в мережі з метою перерозподілу самих БК. В них приймають участь як БК, яки увімкнуті на повну потужність, так і не повність завантажені БК. Зниження втрат відбувається як за рахунок додаткової компенсації реактивної складової навантажень, так і за рахунок компенсіції того ж навантаження, якщо воно протікає по шляхам з більшим опором.

Було розроблено алгоритм і програму комплексної оптимізації РЕМ. За даними схеми, яка складалась з 2 ЦЖ, 51 лінії, 37 ТП і 6 БК проведено три розрахунки. Перший - оптимізація реактивної потужності і напруги вихідної схеми. Другий - поетапна оптимізація. Вона проводилась таким чином. Вимикались БК і оптимізувалась схема РЕМ. Для отриманої конфігурації проводилась оптимізацям потужностей БК і напруги ЦЖ. Третій - комплексна оптимізація. З результатів розрахунків (табл. 1 і 2) можна бачити, що за рахунок перерозподілу

Таблиця 1. Параметри режимів при різних розрахунках.

N р/р	Підсхема 1			Підсхема 2			По схемі	
	$U_{цж}$, [кВ]	Споживання, [кВт]	$П_1$, [кВт]	$U_{цп}$, [кВ]	Споживання, [кВт]	$П_2$, [кВт]	П, [кВт]	Споживання, [кВт]
1	10.36	2067.83	60.28	10.30	1349.14	35.72	96.00	3416.97
2	10.36	2067.83	60.28	10.33	1347.49	31.96	92.24	3415.32
3	10.27	2115.05	61.48	10.32	1285.49	29.83	91.31	3400.54

Таблиця 2. Зміна потужностей та джерел живлення БК.

БК	Розрахунок 1		Розрахунок 2		Розрахунок 3		Q
	П/сх	Q, [кВАр]	П/сх	Q, [кВАр]	П/сх	Q, [кВАр]	[кВАр]
1	1	200.00	1	200.00	1	200.00	200
2	1	687.00	1	687.00	1	429.34	687
3	1	139.00	1	139.00	1	139.00	139
4	2	100.00	2	100.00	2	100.00	100
5	2	339.00	2	257.41	2	367,92	620
6	2	196.85	2	158.18	1	410.77	810

навантажень після оптимізації схеми (розрахунок 2) споживання і втрати потужності знизились порівняно до розрахунку 1. В обох розрахунках БК підсхеми 1 завантажені на 100%. Тим часом БК підсхеми 2 завантажені на 65% і 41,7% відповідно. Після комплексної оптимізації схема змінилась так, що БК 6 увійшла до підсхеми 1. Завантаження БК обох підсхем стало майже рівним 64,22% і 64,9% відповідно. Ще більше знизились втрати і споживання активної потужності, що доводить ефективність запропонованого методу.

У <u>четвертому розділі</u> розглядаються основні принципи побудови автоматизованих систем управління (АСУ) режимами розподільчих мереж в темпі процесу, склад і функції відповідних програмних засобів.

Схема АСУ режимами РЕМ виглядає таким чином (Рис.1). По ТВ і

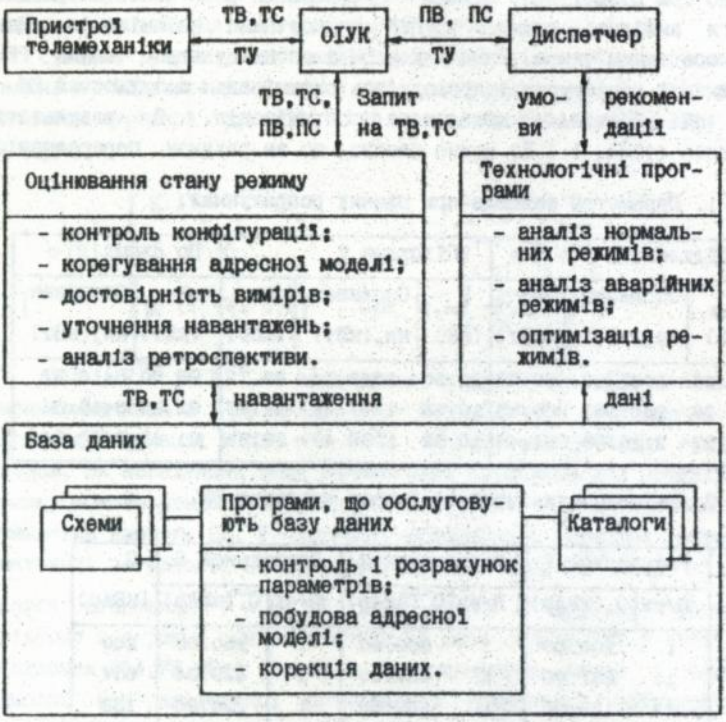

Рис. 1. Схема АСУ режимами РЕМ в темпі процесу.

ТС, які поступають від оперативно-інформаційного управляючого комплексу (ОІУК), і даним, які вносить диспетчер, виконується оцінювання стану режиму. Потім, у відповідності до мети і обраних засобів управління, розраховуються оптимальні управляючі дії. Якщо отримані результати відповідають вимогам, диспетчер реалізує телеуправління (ТУ). В іншому випадку необхідно відкорегувати цілі, умови або склад засобів управління. При відпрацьованій системі і простих процедурах управління (наприклад, регулювання напруги ЦЖ) диспетчера можна виключити із контура прийняття рішень.

Для розв'язання задач оперативного управління і планування режимів РЕМ було разроблено програмний комплекс "ЕКСПЕРТ". До його складу входять:

1. Програми роботи з базою даних. Вони виконують контроль і

підготовку вихідних даних до розрахунків (визначення параметрів схем заміщення елементів РЕМ, побудова адресної моделі), забезпечують перегляд і корекцію даних, задають умови розрахунків.

2. Програми оцінювання стану. Виконують корекцію і контроль конфігурації схеми, підвищення достовірності ТВ, уточнення навантажень, корекцію ДГ.

3. Програми аналізу нормальних режимів. Аналіз завантаження РЕМ, рівнів напруги, втрат потужності. Розрахунок втрат енергії (в тому числі і з врахуванням балансової належності елементів).

4. Програми аналізу аварійних режимів. Визначення струмів короткого замикання та замикання на землю, розрахунок термічної стійкості кабельних ліній, еквітокових інтервалів, визначення варіантів відновлення електроживлення.

5.Програми оптимізації режимів. Оптимізація конфігурації РЕМ, вибір закону регулювання напруги ЦЖ, централізована оптимізація потужності БК, оптимізація реактивної потужності і напруги, комплексна оптимізація режиму.

Зазначені програми вирішують основні завдання управління режимами РЕМ в темпі процесу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи запропонований комплекс методів моделювання та оптимального управління режимами розподільчих електричних мереж в темпі процесу, застосування яких підвищує економічність та надійність функціонування енергетичних систем. Висновки, які відображують суть роботи, можуть бути сформульовані таким чином.

1. Проведено аналіз структури РЕМ, складу і характеристик обладнання, реальних обсягів електроспоживання. Доведено, що спрощуючі допущення, які застосовуються в моделях РЕМ при плануванні режимів, призводять до суттєвих похибок при розв'язанні задач управління в темпі процесу. Для підвищення адекватності моделі режиму РЕМ в схемах заміщення обладнання необхідно враховувати активні і реактивні складові опорів і провідностей, а при заданні навантажень - їх фазові кути. Для більш точного відображення процесу зміни навантаження протягом доби доцільно використовувати не типові, а індивідуальні добові графіки.

2. Задання міри невизначеності навантажень пропонується здійснювати на основі теорії нечітких множин. На відміну від відомих підходів, навантаження задається не нечіткою множиною, а нечітким числом, вибір якого здійснюється за допомогою принципу узагальнення.

Це дозволяє просто і однозначно переходити від нечітких значень навантажень при оцінюванні стану до детермінованих значень при аналізі і оптимізації режиму.

3. На основі методу адресних відображень розроблено єдину адресну модель РЕМ, яка забезпечує компактне зберігання інформації, високу швидкодію при моделюванні і оптимізації режимів, ефективний контроль і корегування конфігурації схеми мережі.

4. Запропоновано і обгрунтовано представлення телевимірів нечіткими унімодальними числами (L-R)-типу, де модою нечіткого числа є значення ТВ, а коефіцієнтами нечіткості - довірча похибка вимірювання. Це дозволяє відобразити неточність ТВ при відсутності стохастичних характеристик і невідомій похибці вимірювання.

5. Розроблено метод оцінювання стану РЕМ за даними телевимірів, який базується на теорії нечітких множин і топологічному аналізі схеми. Він дозволя визначити помилкові ТВ, провести корекцію сумнівних ТВ і уточнити значення навантажень. Використання при корекції сумнівних ТВ їх довірчих похибок для для визначення додатків до вихідних значень ТВ, може призводити до значного спотворення достатньо точних значень ТВ. Тому при розподілі небалансів струмів у вузлах запропоновано і обгрунтовано використання в якості вагового коефіцієнта доповнення до ФН, яка визначається як перетин НЧ (L-R)-типу відповідних струмів.

6. Запропоновано метод обробки ретроспективи оцінених значень навантажень ТП. Він дозволяє уточнювати значення навантажень, їх ДГ і відповідних ФН; визначити ТП, в яких необхідно першочергово проводити додаткові вимірювання в зазначену годину доби.

7. Проведено аналіз функцій втрат і споживання активної потужності, їх похідних і елементів матриці Гессе в залежності від струмів БК. Він показав, що ці функції є неперервними і мають (у переважній більшості випадків) єдиний глобальний мінімум. Розроблено градієнтний метод пошуку оптимальних значень потужностей БК при централізованому управлінні ними. Визначення на кожній ітерації оптимального коефіцієнту шагу і автодемпфування вектора градієнта забезпечують його стійкість і хорошу збіжність. Даний метод, по відношенню до відомих, підвищує ступень використання наявних джерел реактивної потужності, що призводить до додаткового зниження втрат і електроспоживання, зменьшення завантаження мережі, вирівнювання профіля напруги. А використання сумісно з централізованим управлінням БК оптимального регулювання напруги поряд з покращенням економічних показників розширює можливості по управлінню якістю електроенергії.

8. Розроблено метод комплексної оптимізації РЕМ. На відміну від традиційних підходів, він дозволяє змінювати конфігурацію розподільчої мережі таким чином, щоб оптимально перерозподіляти не лише навантаження, а і джерела реактивної потужності.

9.На основі запропонованих методів і алгоритмів розроблено програми, які увійшли до комплексу аналізу і оптимізації режимів РЕМ "ЕКСПЕРТ". Вони впроваджені на ряді енергетичних підприємств України і колишнього СРСР, і показали високу надійність, ефективність і швидкодію при розрахунках реальних схем.

Основні публікації по темі дисертації:

1. Анализ режимов электрических сетей 6-20 кВ в реальном времени/ Ройтельман И.Г., Томашкевич М.Г., Чешенков А.Г., Шполянский О.Г.// Электрические сети и системы: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- Львов: Выща школа, 1989.- N25. -С.51-56.

2. Ройтельман И.Г., Чешенков А.Г., Шполянский О.Г. Оценивание состояния в электросетях напряжением 6-20 кВ// Электричество. -1990. -N10. -С.60-63.

3. Олянишин В.О., Джима О.Н., Шполянский О.Г. Планирование оптимальных режимов городских электрических сетей// Преобразование и стабилизации параметров электроэнергии: Сб. науч. трудов. -Киев: Наукова думка, 1990. -С. 30-33.

4. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Шполянский О.Г. Автоматизированная система управления распределением электроэнергии ЭКСПЕРТ.// Проблемы и опыт внедрения автоматизированных систем управления в энергетике на основе вычислительной техники: Сб. докладов научно-технической конференции (Ташкент, 29-31 мая 1991г.),Ташкент: Ин-т энергетики и автоматики УзССР, 1991, С. 3-5.

5. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Шполянский О.Г. Новое поколение автоматизированных систем диспетчерского управления распределительными электросетями. Automatizace a řízení distribucních soustav III: Sborník prednasek celostatní konference (Табор, Чехословакия, 23-25 апреля 1989г.). -Ceske Budejovice, 1989, С.210-215.

6. Шполянский О.Г. Централизованное управление батареями конденсаторов в распределительных электрических сетях.// Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. Сборник трудов III Международной конф. (Украина, Мариуполь 15-17 сен. 1994 г.), Мариуполь, 1994, С. 305-307.

7. Шполянский О.Г. Уточнение нагрузок распределительной электрической сети по результатам оценивания состояния ее режима. Seminarium Polsko-Ukrainskie "Problemy Elektroenergetyki". Сборник

докладов(Лодзь, 5-7 декабря). Łodz: Politechnika Łodzka Instytut Elektroenergetyki 1995, С. 83-88.

Особистий внесок автора в роботах, написаних у співавторстві полягає у наступному: розробка моделі режиму [1,2,3,4,5]; розробка алгоритму і програми оцінювання стану [2,5]; розробка бази даних [3,4,5].

ABSTRACT

Shpolyanskyy O.G. Distribution electrical networks control in rate of the process. A thesis, as manuscript, for obtaining of a scientific degree of the candidate of engineering sciences on a speciality 05.14.02 - Electric power station (electrical part), networks, electric power systems and control by them, Institute of electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997.

In this thesis the existing models and methods of control of distribution electrical networks are analysed. Improvements of a model, raising its adequacy, are made. It is offered to represent a load by fuzzy number, and telemeasurement by (L-R) fuzzy number. Method of a state estimation is developed. It is based on the fuzzy sets theories and topological analysis of the scheme. The thesis represents methods of co-ordinative control by batteries of capacitor, reactive power and voltage optimization, general state optimization. They are more effective on a comparison with known. The methods and algorithms, which are represented in this thesis, have become a basis of the industrial programs. They are introduced on power systems firms.

АННОТАЦИЯ

Шполянский О.Г. Управление режимами распределительных электрических сетей в темпе процесса. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 Электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими. Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 1997.

В диссертации проведен анализ существующих моделей и методов управления распредсетями. Сделаны уточнения модели, повышающие ее адекватность. Предложено представлять нагрузку нечетким числом, а телеизмерение нечетким числом (L-R)-типа. На основе теории нечетких множеств и топологическом анализе схемы разработан метод оценивания состояния режима. В диссертации представлены методы централизованого управления батареями конденсаторов, оптимизации реактивной мощности и напряжения, комплексной оптимизации режимов. Они показали большую эффективность по сравнению с известными. Методы и алгоритмы, которые описаны в работе, легли в основу промышленных программ. Они внедрены на ряде энергопредприятий.

Ключові слова: розподільча електрична мережа, модель режиму, теорія нечітких множин, оцінювання стану, оптимізація, управління в темпі процесу.

Підписано до друку 21.05.97р. Формат 60х84/16
Папір офсетний. Умовн.-друк.аркуш. 1,0.
Об.-вид.аркуш 1,0. Тираж 100 . Замовл. 158 .

Поліграф. дільн. Інституту електродинаміки АН України,
252680, Київ-57, проспект Перемоги,56