

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Лесько Владислав Олександрович

УДК 621.311.161

**ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ
В НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ
ДО ЗБУРЕНЬ У ВУЗЛАХ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, доцент
Данилюк Олександр Володимирович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри електричних систем і мереж

– кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Тугай Юрій Іванович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання

Захист відбудеться "27" листопада 2009 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 230 ГУК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий "27" жовтня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. Ц. Зелінський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зміни, які відбулися в енергетиці України за останні роки, виявили пріоритетність і актуальність досліджень, направлених на розв'язання задач по енергозбереженню на новому якісному рівні. І однією з актуальних, з позицій зниження втрат електроенергії в електроенергетичних системах (ЕЕС), є задача оперативного визначення і мінімізації втрат потужності з врахуванням чутливості при її передачі та розподілі.

Енергосистеми постійно знаходяться під дією зовнішніх і внутрішніх збурень. Збурення можуть виникати в ЕЕС в одній або декількох точках одночасно. В залежності від їх значення наслідки можуть характеризуватися кількісними змінами параметрів режиму в межах допустимих їх змін або якісними змінами режиму. В даній роботі розглядається випадок, коли збурення за своїм впливом не можуть вивести режим з допустимої області, або утримується в ній засобами автоматичного регулювання. Однак, втрати потужності при цьому як в системі в цілому, так і в окремих її елементах можуть досягати критичних значень.

Складність утримання або введення режиму ЕЕС в допустиму область полягає в тому, що через неоднорідність електричних мереж реакція параметрів режиму у різних її вузлах і вітках на збурення суттєво відрізняється. Відповідно вимагається різна дія окремих регулюючих пристроїв (РП) (джерел активної і реактивної потужності, трансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням, лінійних регуляторів тощо) на параметри режиму елементів і підсистем ЕЕС. Вплив РП носить системний характер і тому необхідно розглядати зміну їх параметрів як вплив не тільки на окремі параметри режиму, а й на загальносистемні характеристики, такі як сумарні втрати активної потужності в електричних мережах ЕЕС, втрати від транзитних перетоків потужності та втрати в окремих контрольованих вітках. Останнє є актуальним в умовах адресного електропостачання.

Реакція на збурення в системі потоків потужності, в тому числі транзитних, і відповідний вплив їх на значення втрат потужності, а також на ефективність дій, направлених на компенсацію неоднорідності електричних мереж, залежить від структурних характеристик ЕЕС. Для аналізу та оцінки впливу збурень на параметри режиму і його характеристики, а також для дослідження структурних властивостей електричних мереж і системи в цілому ефективним є використання натурно-імітаційного моделювання. Надто, коли в якості інформаційного забезпечення використовується база даних оперативного інформаційно-керувального комплексу (ОІКК) АСДК ЕЕС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами "Розробка критеріїв оцінки і способів аналізу чутливості оптимальних рішень в електроенергетиці" (№ держреєстрації 0101U004670), "Оптимальне керування взаємними і транзитними перетоками потужності в об'єднаних енергетичних системах" (№ держреєстрації 0107U02091).

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є підвищення ефективності заходів щодо зменшення втрат потужності в неоднорідних електричних мережах шляхом врахування чутливості параметрів режиму до збурень у вузлах ЕЕС.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні завдання**:

- аналіз залежності результатів компенсації негативного впливу збурень в неоднорідних електричних мережах від розрахункових умов;
- розробка методу визначення втрат потужності у заданій частині електричної мережі або окремих її вітці від потужності навантаження або генерування у вузлах;
- аналіз і оцінка чутливості з врахуванням похибок телеметрії при невеликих збуреннях (збільшенні або зменшенні потужності у вузлах) на результат оптимального поточкорозподілу в електричних мережах;
- розробка натурно-імітаційної моделі для аналізу чутливості втрат потужності в електричних мережах і оцінювання коригуючих дій системи автоматичного керування у відповідності зі збуреннями в ЕЕС;
- розробка алгоритмів оптимального керування перетоками активної потужності для компенсації впливу неоднорідності електричної мережі з використанням матриці чутливості й врахуванням похибок телевимірювань та розрахунку.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими електроенергетичних систем, а **предметом дослідження** – методи аналізу та оцінки чутливості параметрів режиму електричних мереж до збурень у вузлах та транзитних перетікань.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані узагальнювальні методи теорії подібності і моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими моделюються і аналізуються на базі методу вузлових напруг. Для розробки алгоритмів і програм аналізу взаємовпливу, чутливості та формування законів оптимального керування потоками потужності в ЕЕС використовувались матрична алгебра, теорія графів та декомпозиція, а також натурно-імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні результати, що становлять наукову новизну, такі:

- встановлено залежність результатів компенсації негативного впливу збурень в неоднорідних електричних мережах від розрахункових умов, яка може бути використана для оптимізації режимів електричних мереж і зменшення в них додаткових втрат електроенергії;
- розвинуто метод визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках електричних мереж ЕЕС до збурень у вузлах, що дозволяє відповідним чином ранжувати вітки та з більшою ефективністю проводити заходи щодо зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні і розподілі;
- вперше розроблена натурно-імітаційна модель для оцінки чутливості втрат потужності в електричних мережах, яка на відміну від відомих використовується для коригування дій системи автоматичного керування у

відповідності зі збуреннями в ЕЕС, в тому числі зі зміною транзитних перетікань, що дозволило вдосконалити систему оптимального керування потоками потужності й напругою в ЕЕС.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що з використанням матриці коефіцієнтів чутливості розроблено алгоритми визначення додаткових втрат потужності у вітках при збуреннях у вузлах та при зміні розрахункових умов, зокрема, балансуєчого вузла як наслідку взаємовпливу режимів неоднорідних електричних мереж ЕЕС.

На основі розроблених методів та алгоритмів модифіковано програмний комплекс аналізу чутливості та оптимізації втрат потужності в ЕЕС (АЧП), який призначено для розрахунків, структурування та аналізу втрат потужності і електроенергії.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – розроблено алгоритм оперативного керування нормальними режимами ЕЕС, який дозволяє ввести в систему керування режимами зворотній зв'язок, контролювати виконання впливів і оцінювати ефективність керування як окремими трансформаторами, так і мережею в цілому; [2] – сформовано закони оптимального керування потоками потужності та напругою в електричних мережах енергосистеми, виконано аналіз результатів розрахунків, які підтверджують актуальність поставленої задачі на дослідження; [3] – побудована критеріальна модель оцінки якості функціонування систем автоматичного керування (САК) за критерієм максимуму знаходження в станах задовільної готовності до виконання своїх функцій; [4] – розроблено метод формування матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС до збурень у вузлах; [5] – розроблено натурно-імітаційну модель для оцінки чутливості втрат від потоків потужності, в тому числі від транзитних і адресних; [6] – запропоновано метод оцінки чутливості параметрів режиму ЕЕС до зміни навантаження у вузлах схеми; [7] – розроблено алгоритм використання критеріальної моделі якості функціонування системи оптимального керування для врахування її готовності виконувати визначені для неї завдання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідалися й обговорювалися на 8-ій міжнародній науково-технічній конференції “Контроль і управління в складних системах” (Вінниця, 2005); – на 11-ій міжнародній науково-технічній конференції “Контроль і управління в складних системах” (Вінниця, 2008); – на науково-технічній конференції “Стан електричних мереж обленерго та основні напрямки підвищення їх ефективності. Зменшення втрат електроенергії в електричних мережах” (Місхор, АР Крим, 2006); – на міжнародній науково-технічній конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (Луцьк, 2006); – на міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці” (Кременчук, 2007); – на міжнародній науково-технічній

конференції “Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці” (Львів, 2007); – на міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” (Харків, 2007); – на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та працівників інженерно-технічних підприємств м. Вінниці та області у 2003 – 2009 роках.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 7 статей у фахових наукових журналах.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (102 найменування), чотирьох додатків. Основний зміст викладений на 130 сторінках друкованого тексту, містить 23 рисунки, 11 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 187 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також наведені відомості про апробацію отриманих результатів.

У **першому розділі** проаналізовано проблеми моделювання процесу оптимізації в неоднорідних ЕЕС для аналізу чутливості оптимальних рішень при малих збуреннях та підходи по дослідженню спостережності та чутливості в неоднорідних ЕЕС з врахуванням похибки телевимірювань, показано доцільність дослідження режимів ЕЕС за допомогою натурно-імітаційного моделювання при керуванні нормальними режимами в неоднорідних ЕЕС з врахуванням чутливості та особливостей побудови ієрархічної структури керування ЕЕС, а також обґрунтовано та аргументовано задачі наукового дослідження.

Оскільки режими ЕЕС піддаються постійним внутрішнім і зовнішнім збуренням (зміна навантаження або генерування у вузлах, зміна транзитних і адресних потоків), то вимагається відповідна реакція на них з боку системи оптимального керування. Можливі два випадки: 1) в результаті таких збурень режим електричних мереж залишається в області оптимальності; 2) значення критерію оптимальності (сумарних втрат активної потужності) вийшло за межі області оптимальності. В першому випадку ніяких дій регулюючими пристроями непотрібно. В іншому випадку необхідно визначитися, якими РП і як вводити режим в область оптимальності. Оскільки в неоднорідних мережах в результаті збурень зміна втрат потужності у вітках відбувається не пропорційно, то очевидно, що не всіма РП це в однаковій мірі ефективно робити.

Значення критерію оптимальності в основному змінюється в результаті приростів втрат тільки в частини віток. Яких саме, – це залежить від параметрів електричних мереж, а також від місця збурень в системі. Щоб виділити в ЕЕС вітки з найбільшими приростами втрат в результаті збурень в певному вузлі

(вузлах), необхідно оцінити чутливість втрат у вітках електричних мереж до змін потужності у вузлах.

Проведено аналіз методів оцінки чутливості втрат потужності в ЕЕС від невеликих збурень, зокрема за допомогою матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності з лінійним представленням навантаження і використанням результатів розрахунку усталеного режиму. Наявні методи визначення втрат потужності у виділеній вітці не дають можливість визначити міру впливу збурення у будь-якому вузлі системи на приріст втрат потужності у цій вітці з прийнятною точністю.

Показано, що доцільно розробити метод визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках електричних мереж ЕЕС до збурень у вузлах, який би дозволяв відповідним чином ранжувати вітки та з більшою ефективністю здійснювати оптимізуючі дії для зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні і розподілі. При цьому повинні враховуватися неповна спостережність режимів електричних мереж, фактори і розрахункові умови, що впливають на точність результатів розрахунків, похибки телевимірювання параметрів режиму, тощо.

В умовах, що склалися на сьогодні в енергосистемах з технічним станом електрообладнання та інформаційним забезпеченням, ефективним може бути застосування натурно-імітаційного моделювання для аналізу поточних режимів електричних мереж, а також оцінювання ефективності оптимізуючих впливів на них. В процесі такого моделювання, якщо в якості інформаційного забезпечення використати базу даних ОІКК, можливе дослідження структурних і топологічних особливостей електричних мереж, визначення слабких місць з позицій втрат електроенергії та оцінювання ефективності заходів по їх зменшенню. Для реалізації сказаного необхідно розробити натурно-імітаційну модель для оцінки чутливості втрат потужності в електричних мережах, яка б дозволяла аналізувати і оцінювати дії САК у відповідності зі збуреннями в ЕЕС, в тому числі зі зміною транзитних перетікань.

У **другому розділі** вдосконалено метод визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках електричних мереж ЕЕС до збурень у вузлах та показано, що чутливість втрат потужності у вітках залежить від параметрів системи, її топології, значень напруги у вузлах, а також розрахункових умов, зокрема вибору балансувального вузла.

Розроблений в дисертації метод визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності базується на тому, що втрати у виділеній вітці схеми ЕЕС від навантаження довільного вузла, можуть бути визначені через спад напруги у цій вітці та частковий струм, що зумовлений навантаженням даного вузла та розраховується з використанням матриці струморозподілу. Вузлові напруги та струмові навантаження визначаються з результатів розрахунку усталеного режиму ЕЕС при зафіксованих значеннях потужностей у вузлах. Розрахунок режиму може виконуватися за допомогою промислових програм розрахунку усталених режимів.

На базі розробленої моделі нормального режиму, незалежними параметрами якої є напруги та потужності у вузлах, за відомою методикою розраховується матриця втрат потужності в i -й вітці ЕЕС

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i \dot{\mathbf{S}}, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}$ – i -й рядок матриці \mathbf{T} , що відповідає i -й вітці; $\dot{\mathbf{U}}_t$ – транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і базисний; $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ – i -й рядок матриці з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансуючий; $\hat{\mathbf{C}}_i$ – i -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах по вітках схеми; $\dot{\mathbf{U}}_d$ – діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і базисний.

Якщо допустити, що коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках є незмінними, то при зміні потужності у вузлах, тобто при переході від k -го режиму до $k+1$ -го, втрати потужності в i -й вітці також зміняться і їх прирости будуть рівні

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i (\dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1}), \quad (2)$$

де $\dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1} = \delta \dot{\mathbf{S}}$ – зміна потужності у вузлах ЕЕС при переході з k -го режиму до $k+1$ -го.

Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках в загальному випадку залежать від напруги у вузлах \mathbf{U} , яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування. В цьому випадку при зміні потужності у вузлах, втрати потужності в i -й вітці зміняться і, на відміну від (2), їх прирости будуть рівні

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$$

або, з врахуванням того, що $\dot{\mathbf{S}}^{k+1} = \dot{\mathbf{S}}^k + \delta \dot{\mathbf{S}}$, а $\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1}$,

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_i = \delta \dot{\mathbf{T}}_i \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} \delta \dot{\mathbf{S}}. \quad (3)$$

Якщо зміни відбулися тільки в одному вузлі – g -му, то приріст втрат потужності в i -й вітці від зміни потужності в g -му вузлі на $\delta \dot{\mathbf{S}}_g$ у відповідності з (3) буде

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig} = \delta \dot{t}_{ig} \dot{\mathbf{S}}_g^k - \dot{t}_{ig}^{k+1} \delta \dot{\mathbf{S}}_g. \quad (4)$$

З (4) коефіцієнт чутливості втрат потужності в i -й вітці до зміни потужності в g -му вузлі при переході від k -го до $k+1$ -го режиму з врахуванням зміни напруги у вузлах

$$\dot{t}_{ig}^{k+1} = -\frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig}}{\delta \dot{\mathbf{S}}_g} + \frac{\delta \dot{t}_{ig}}{\delta \dot{\mathbf{S}}_g} \dot{\mathbf{S}}_g^k. \quad (5)$$

З порівняння (4) і (5) видно, що в загальному чутливість втрат потужності в i -й вітці до зміни потужності в g -му вузлі залежить також від чутливості коефіцієнта $\dot{t}_{ig} \frac{\delta \dot{t}_{ig}}{\delta \dot{\mathbf{S}}_g}$ і від значення потужностей в режимі, що передують змінам $\dot{\mathbf{S}}_g^k$.

Приріст коефіцієнта чутливості $\delta \dot{t}_{ig}$ можна знайти з визначення вектор-рядка матриці \mathbf{T}

$$\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} = (\dot{\mathbf{U}}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma_i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_d^k)^{-1} - (\dot{\mathbf{U}}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma_i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_d^{k+1})^{-1}.$$

В діагональній матриці $\delta \dot{\mathbf{U}}_{id}$ її елементи визначаються як $\frac{\Delta \dot{U}_i}{\dot{U}_j}$, $j = \overline{1, m}$, де

$$\Delta \dot{U}_i = \dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma_i} - \text{падіння напруги на } i\text{-й вітці.}$$

Значення елементів матриці \mathbf{T} дає можливість визначити, які вітки найбільше реагують на зміну напруги у вузлах, яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах.

З врахуванням того, що $\Delta \dot{U}_i^k = \dot{\mathbf{U}}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma_i}$ і $\Delta \dot{U}_i^{k+1} = \dot{\mathbf{U}}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma_i}$ – відповідно, падіння напруги на i -й вітці в k -му і $k+1$ -му режимах, останній вираз переписується:

$$\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \hat{\mathbf{C}}_i [\Delta \dot{U}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_d^k)^{-1} - \Delta \dot{U}_i^{k+1} (\dot{\mathbf{U}}_d^{k+1})^{-1}] = \hat{\mathbf{C}}_i \Delta \dot{U}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_d^k)^{-1} (1 - \sigma_{\Delta i} \sigma_u^{-1}). \quad (6)$$

У виразі (6): $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{U}_i^{k+1}}{\Delta \dot{U}_i^k}$ – відносна зміна падіння напруги на i -й вітці при

зміні навантаження у вузлах; $\sigma_u = \dot{\mathbf{U}}_d^k (\dot{\mathbf{U}}_d^{k+1})^{-1}$ – діагональна матриця відносних змін напруги у вузлах при зміні навантаження в системі.

Як видно з (6), приріст коефіцієнта чутливості $\delta \dot{\mathbf{T}}_i$ залежить тільки від зміни напруги у вузлах при збуреннях в них. Наприклад, при зміні навантаження тільки в g -му вузлі приріст коефіцієнта чутливості в i -й вітці

$$\delta t_{ig} = c_{ig} \frac{\Delta \dot{U}_i^k}{\dot{U}_g^k} \left(1 - \frac{\sigma_{\Delta i}}{\sigma_{ug}}\right),$$

де $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{U}_i^{k+1}}{\Delta \dot{U}_i^k} = \frac{\dot{U}_p^{k+1} - \dot{U}_q^{k+1}}{\dot{U}_p^k - \dot{U}_q^k}$ (p і q – номери вузлів, що обмежують i -ту вітку);

$$\sigma_{ug} = \frac{\dot{U}_g^{k+1}}{\dot{U}_g^k}.$$

Отримані формули приростів коефіцієнтів чутливості $\delta \dot{\mathbf{T}}_i$ можуть використовуватися для уточнення чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС тоді, коли результати оцінки і ранжування віток виявились достатньо близькими, і це ускладнює прийняття оптимальних рішень.

По аналогії з (5), якщо вважати, що похибка в телевимірюваннях еквівалентна відповідній за значенням зміні потужності у вузлі, можна визначити коефіцієнт чутливості втрат потужності у вітках схеми до похибки телевимірювань у вузлах

$$\Pi_{ig} = \dot{\mathbf{T}}_{ig}^{k+n} \frac{\delta \dot{S}_{ig}}{\delta \dot{S}_g} + \frac{\dot{S}_g^k}{\delta \dot{S}_g}.$$

Чутливість втрат потужності у вітках схеми ЕЕС залежить від параметрів системи, її топології та значень напруги у вузлах. Запропонований метод оцінки чутливості втрат потужності до збурень у вузлах з використанням матриці

чутливості дозволяє визначити оптимальну послідовність коригуючих впливів РП на режими ЕЕС. Матриця чутливості втрат потужності до збурень у вузлах може визначатися за результатами розрахунків ustalених режимів ЕЕС або за результатами телевимірювань.

У **третьому розділі** розроблено алгоритми практичної реалізації методів оцінки та аналізу чутливості втрат потужності у вітках схеми при невеликих збуреннях у вузлах ЕЕС, створена натурно-імітаційна модель керування транзитними перетіканнями ЕЕС на основі аналізу чутливості її елементів. На основі розроблених алгоритмів модифіковано програмний комплекс аналізу чутливості та оптимізації втрат потужності в ЕЕС (АЧП) з метою розширення його можливостей для задач аналізу та структурування втрат електроенергії в ЕЕС.

Відповідно до методу визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності розроблено алгоритм його практичної реалізації (рис. 1).

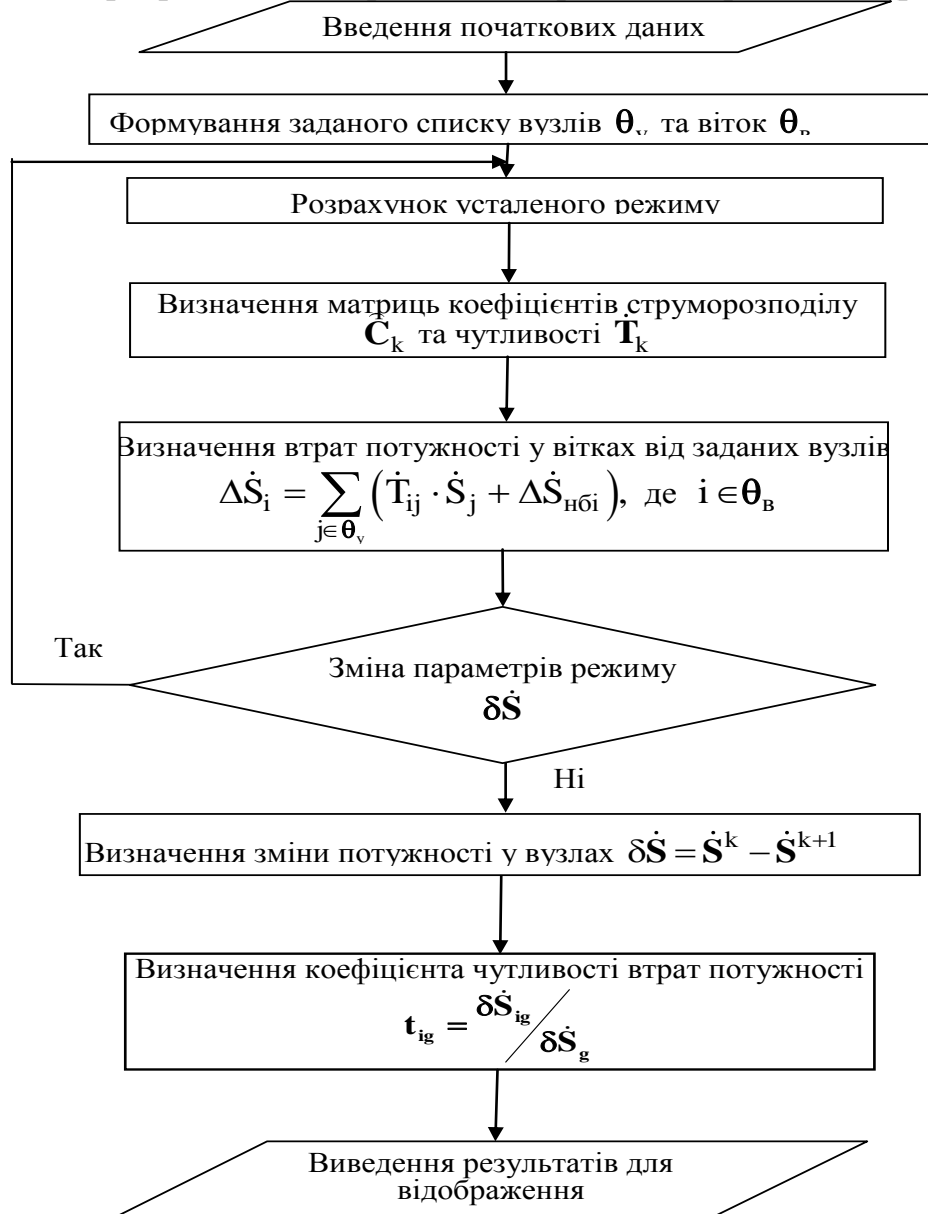


Рис. 1. Алгоритм визначення чутливості втрат потужності у вітках ЕЕС до збурень у вузлах

Визначенню втрат потужності в заданих вітках електричної мережі передують введення початкових даних та формування заданого списку віток θ_v та вузлів θ_y , втрати від протікання потужностей навантажень яких необхідно визначити. На виході з алгоритму передбачається визначення втрат потужності i -тої вітки від вузлових навантажень та виведення результатів для відображення.

За допомогою цього алгоритму може бути виконано якісну і кількісну оцінку впливу збурень у вузлах схеми на чутливість втрат потужності у виділеній вітці. Визначення втрат потужності у вітках схеми в залежності від зміни потужності у вузлах дає можливість визначити коефіцієнт чутливості для кожної вітки. Алгоритм розроблено з використанням залежностей між параметрами режиму.

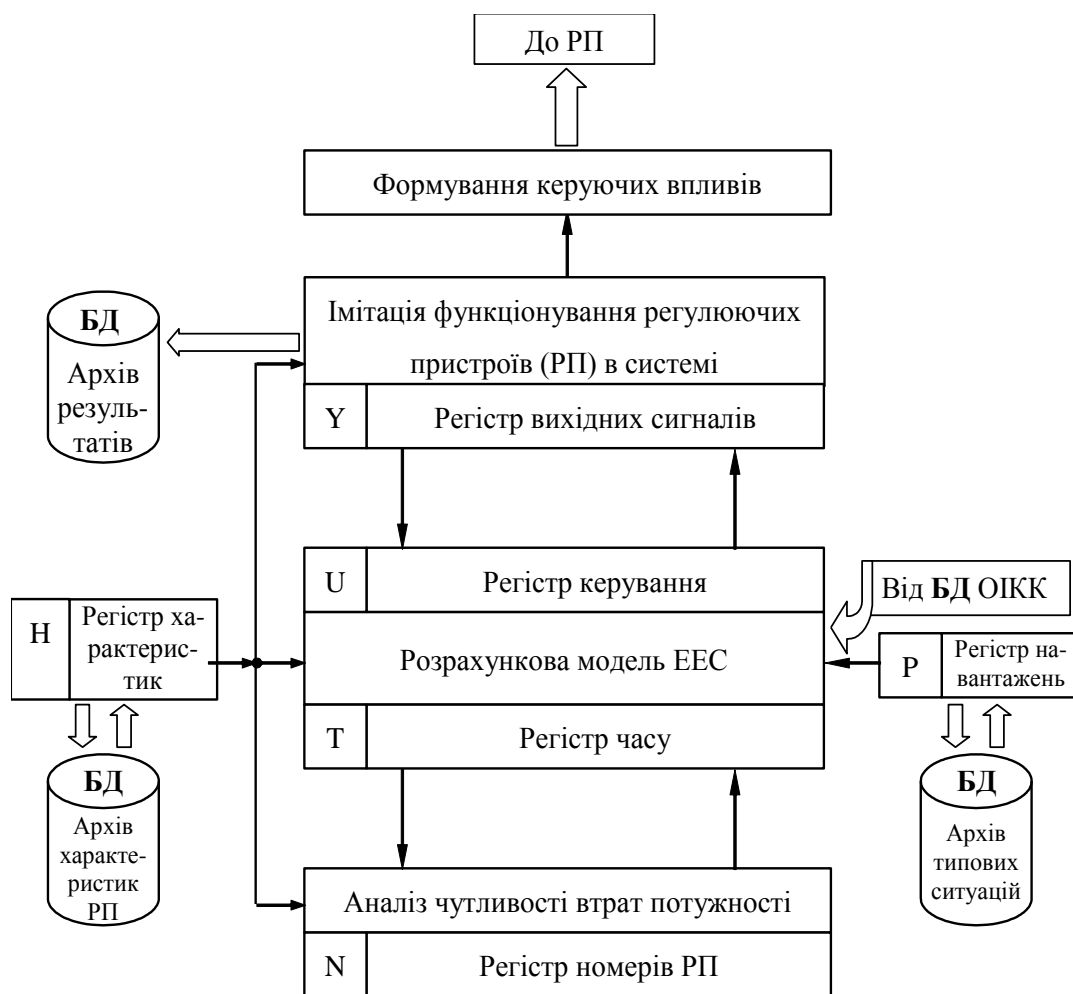


Рис. 2. Натурно-імітаційна модель корегування потоків потужності в ЕЕС на основі аналізу чутливості її елементів

Для одночасного оперативного моніторингу втрат потужності від зміни перетоків, аналізу чутливості елементів ЕЕС та аналізу функціонування систем керування використовується натурно-імітаційне моделювання. Використання розробленої натурно-імітаційної моделі (рис. 2) передбачається у структурі

системи автоматизованого керування потоками потужності в ЕЕС в обчислювальній середовищі TRACE MODE. Система автоматичного керування в середовищі TRACE MODE (рис. 3) складається з кількох рівнів керування.

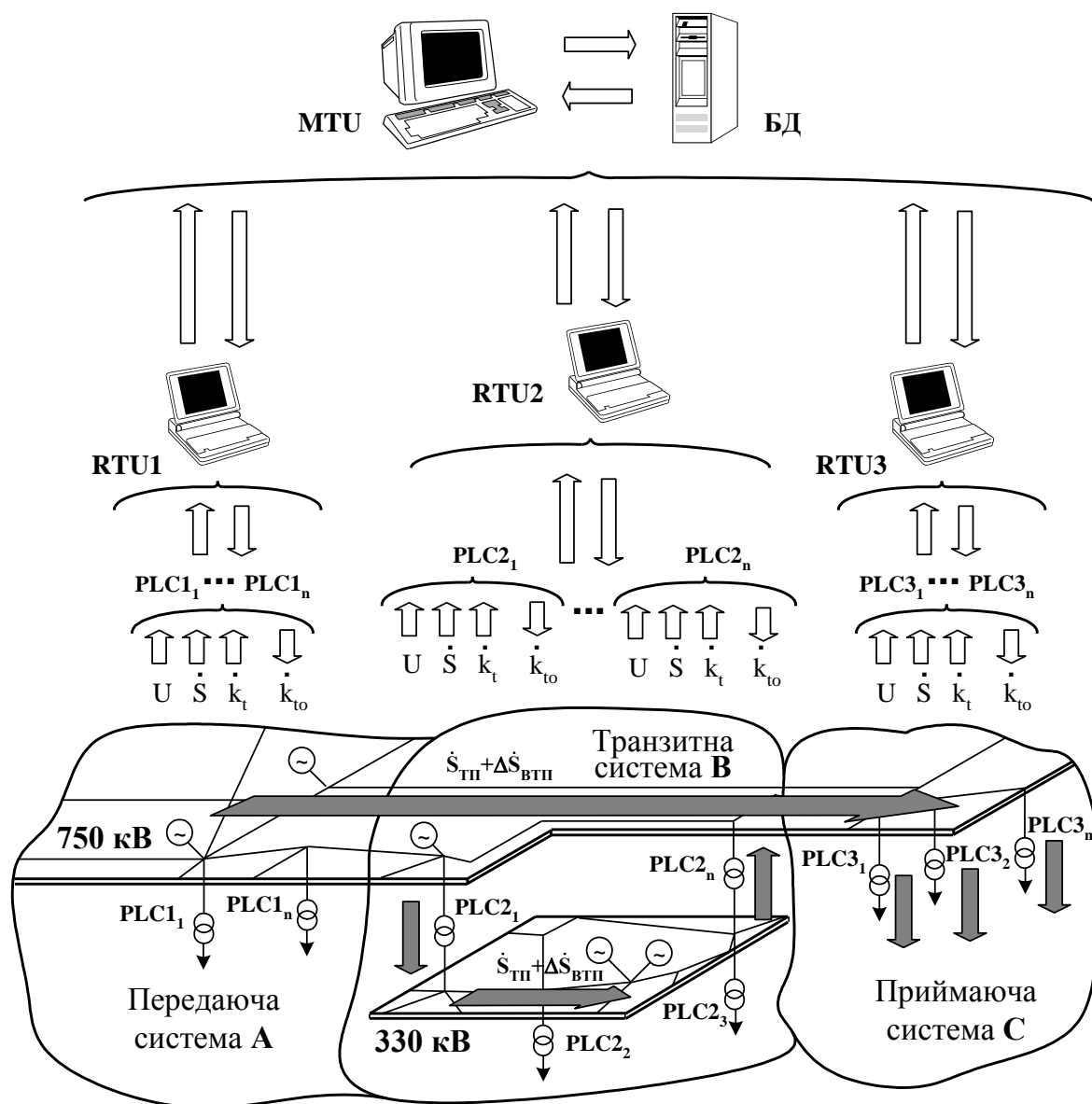


Рис. 3. Система автоматичного керування в середовищі TRACE MODE

На нижньому рівні – рівні віддалених терміналів (моніторів) (Remote Terminal Unit) здійснюється обробка задачі керування в режимі реального часу. Віддалений термінал включає в себе пристрій: від первинних сенсорів, що здійснюють зняття інформації з об'єкту, до спеціалізованих багатопроцесорних відмовостійких обчислювальних комплексів, що здійснюють обробку інформації та керування в режимі реального часу. На цьому рівні використовуються програмовані логічні контролери (PLC). PLC виконують опитування сенсорів та обмін з системою автоматичного керування РПН трансформаторів, призначених для коригування потоків потужності, отримання інформації про стан РПН і передача команд з терміналів вищого рівня. У

вказаній системі керування контролюються значення потужностей \dot{S} і напруг \dot{U} автотрансформаторів з РПН, а також поточні коефіцієнти трансформації. Аналогові діючі значення струмів і напруг фіксуються у вторинних колах трансформаторів струму і напруги, встановлених безпосередньо на об'єкті.

Таким чином, врахування чутливості оптимальних рішень до збурень, в даному випадку зміни перетоків, дозволяє виявити в ЕЕС найбільш чутливі елементи, в яких впливи по зменшенню втрат активної потужності в ЕЕС будуть найефективнішими та економічно доцільними. Здійснення керуючих впливів на потоки потужності в цих вузлах забезпечує досягнення мети – зменшення втрат за раціональних витрат ресурсу РП.

Суть оптимального керування потоками потужності полягає в тому, щоб після відхилення від оптимуму повернути режим в область оптимальності. Після збурення у вузлі (вузлах) мережі виникає приріст втрат $\Delta\delta\dot{S} = \Delta\dot{S}^k - \Delta\dot{S}^{k+1}$. Цей приріст має бути зменшений регулюючими пристроями відповідно їх чутливості до зміни втрат. Приріст втрат $\Delta\delta\dot{S}$ зменшується таким чином, що потоки потужності перерозподіляються так, щоб режим максимально наближався до економічного режиму, який визначається за заступною г-схемою.

Для оцінювання якості функціонування системи керування, яка компенсує впливу збурень у вузлах на втрати потужності у контрольованих вітках, запропоновано метод, оснований на використанні зворотної задачі критеріального програмування. Критерієм якості у нашому випадку є мінімум втрат потужності, які будуть тим менші, чим ближче вдасться наблизити режим до економічного.

Для електричних мереж задача оптимального керування (компенсації впливу збурень) формулюється так:

$$y = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^{n-1} \left(\sigma_{x/rij} \frac{\Delta U_i}{\Delta U_{ri}} \frac{U_{rj}}{U_j} - 1 \right) \right] \rightarrow \min \quad (7)$$

за обмежень

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \sum_{j=1}^{n-1} \hat{C}_{1j} \cdot \frac{\dot{S}_j}{\sqrt{3}\dot{U}_j} \leq I'_{\text{доп } 1} = k_{e1} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \hat{C}_{r1j} \cdot \frac{\dot{S}_{j\text{max}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{rj}} \\ \dots \\ q_m = \sum_{j=1}^{n-1} \hat{C}_{mj} \cdot \frac{\dot{S}_j}{\sqrt{3}\dot{U}_j} \leq I'_{\text{доп } m} = k_{em} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \hat{C}_{rmj} \cdot \frac{\dot{S}_{j\text{max}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{rj}} \end{array} \right. ,$$

де $\dot{S}_{j\text{max}}$ – максимальна потужність вузла j ; \dot{U}_{rj} – напруга вузла j за г-схемою для

потужності $\dot{S}_{j\text{max}}$; \dot{S}_j – значення потужності вузла j ; $\sigma_{x/rij} = \frac{\hat{C}_{ij}}{\hat{C}_{rij}}$ – відношення

коефіцієнтів струморозподілу відповідно при реальному режимі і за г-схемою; $k_{ei} \leq 1$ – коефіцієнт, яким враховується реальний технічний стан

електрообладнання, від якого залежить пропускна здатність i -ої вітки (для ЛЕП, як правило, $k_{ei} = 1$, а для трансформаторних віток значення k_{ei} залежить від ресурсу трансформатора).

В (7) обмеженнями q_i контролюється знаходження режиму в допустимій області.

У четвертому розділі на прикладі реальних ЕЕС показана працездатність та ефективність методів і алгоритмів, запропонованих у попередніх розділах. Виконано розрахунки з оцінки впливу збурень на втрати активної потужності у елементах електричних мереж.

Для електричних мереж 750–110 кВ Південно-Західної ЕЕС (ПЗЕС), схема яких приведена на рис. 4, виконано розрахунок матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках до зміни навантаження у вузлах при різних розрахункових умовах. Виконано розрахунок чутливості втрат потужності при зміні навантаження у вузлі в межах $\pm 5\%$. Для прикладу навантаження змінюється у вузлах 945, 712 та 901. Результати розрахунків приведено в табл. 1. Значення коефіцієнтів чутливості втрат активної потужності в електричних мережах визначаються по відношенню до базового режиму (БР).

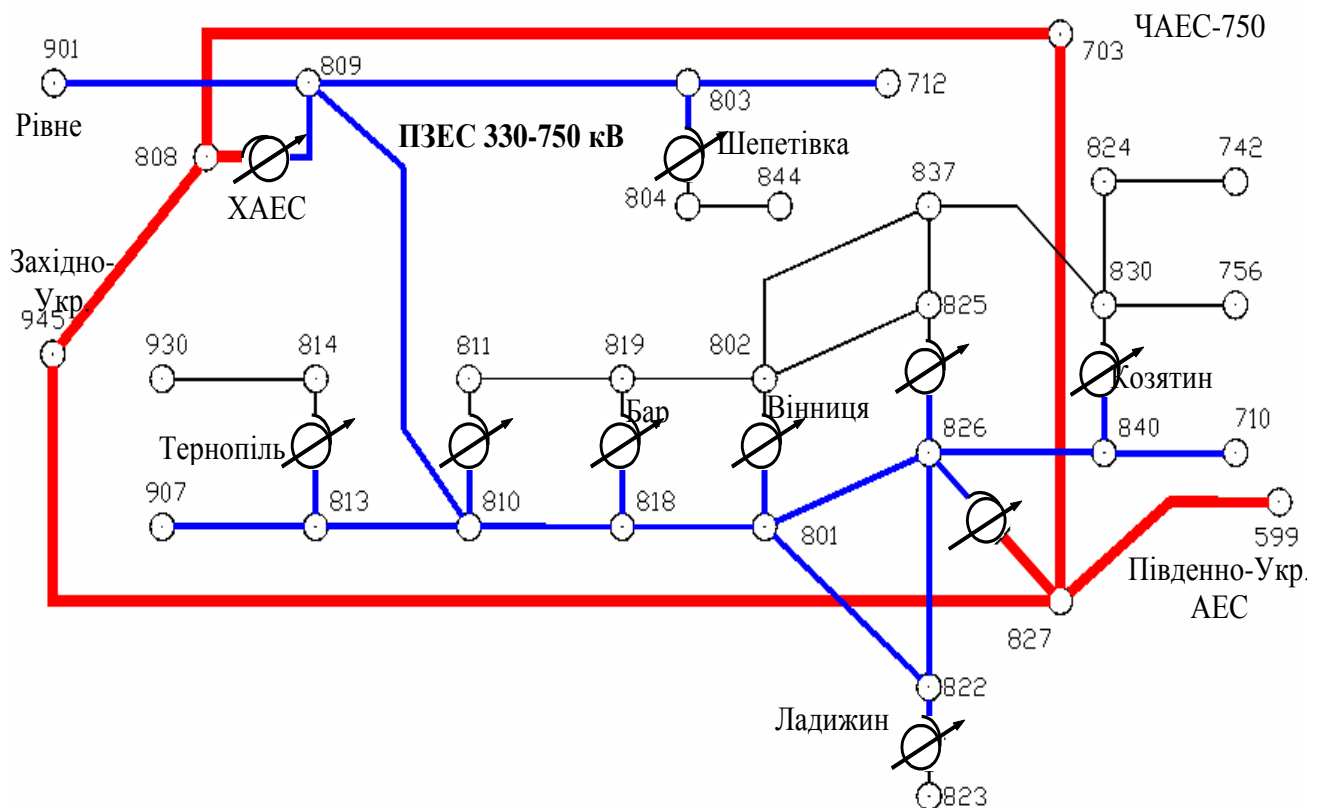


Рис. 4. Схема електричних мереж 750–110 кВ ПЗЕС

Результати розрахунків чутливості сумарних втрат потужності в ЕЕС при зміні навантаження у вузлах 945, 712 та 901

Режим	Втрати потужності в системі (МВт)	Коефіцієнти чутливості втрат в системі
БР	38,54	–
Збурення у вузлі 945		
–5%	38,22	–0,027
+5%	38,78	0,021
Збурення у вузлі 712		
–5%	38,50	–0,003
+5%	38,61	0,005
Збурення у вузлі 901		
–5%	36,95	–0,063
+5%	40,17	0,065
–2	37,93	–0,061
+2%	39,17	0,064

З наведених результатів розрахунків чутливості втрат потужності видно, що коефіцієнти чутливості втрат потужності в ЕЕС при симетричному відхиленні навантаження ($\pm 5\%$, $\pm 2\%$) приймають різні числові значення. Знак коефіцієнтів вказує на збільшення або зменшення приросту втрат. Чутливість втрат в ЕЕС при зміні потужності в окремих вузлах в межах $\pm 5\%$ суттєво відрізняється. Ця різниця складає порядок і більше. Це означає, що оптимізуючі дії в ЕЕС для компенсації впливу збурень потрібно проводити з врахуванням чутливості втрат потужності в ній. Відповідним чином повинні реагувати САК потоками потужності в ЕЕС.

З метою кількісного аналізу чутливості втрат в окремих вітках системи до збурень у вузлах, як приклад, виконані розрахунки при зміні навантаження у вузлі 901 ПЗЕС. Розрахунки проводились для випадків, коли навантаження змінювалося в межах $\pm 5\%$. Значення коефіцієнтів чутливості втрат у вітках схеми при збуреннях у вузлі 901 наведені в табл. 2 (приведені результати тільки для частини віток).

Очевидно, що на збурення у вузлах ЕЕС реагують всі параметри режиму. З табл. 2 видно, що змінюються значення втрат у всіх вітках. Проте різниця, на яку змінюються ці значення, відрізняється на декілька порядків. Запропонований метод аналізу та оцінки чутливості якраз призначений для того, щоб виокремити ті вітки, в яких втрати найбільш чутливі до конкретного збурення. Аналіз таблиці коефіцієнтів чутливості дозволяє визначити вітки, в яких втрати найбільш чутливі, і ранжувати решту віток за ознакою чутливості втрат в них. В нашому прикладі віткою, в якій втрати найчутливіші до збурень

у вузлі 901, є вітка 901–809. Наступними за чутливістю є вітки 808–809, 703–808, 826–822.

Таблиця 2

Коефіцієнти чутливості втрат у вітках при збуренні у вузлі 901

№ Кін.	№ Поч.	Зміна навантаження у вузлі 901			
		+5%	-5%	+2%	-2%
703	808	0.008+0.10i	-0.005-0.073i	0.007+0.098i	-0.004-0.049i
703	827	0.002+0.020i	-0.001-0.018i	0.002+0.019i	0-0.013i
808	809	0.011+0.052i	-0.008-0.041i	0.008+0.058i	-0.006-0.023i
808	945	0.005+0.066i	-0.003-0.045i	0.005+0.063i	-0.003-0.027i
827	826	0.005+0.116i	-0.003-0.087i	0.004+0.121i	-0.002-0.051i
827	599	-0.001-0.001i	-0.001-0.001i	-0.002-0.02i	-0.002-0.002i
945	827	0.005+0.058i	-0.004-0.052i	0.005+0.057i	-0.004-0.041i
814	930	0	0-0.001i	0-0.001i	0-0.001i
819	811	0	0	0.001+0.001i	0
802	819	0.001+0.002	0-0.001	0.001+0.002i	0
802	825	0	0	0	0
901	809	0.031+0.211i	-0.034-0.222i	0.025+0.177i	-0.028-0.182i
809	803	0	0	0+0.006i	0
712	803	0	0-0.002	0-0.005i	-0.001-0.004i
803	804	0	0	0.001-0.002i	0
810	809	0	-0.008-0.147i	-0.007+0.044i	-0.013-0.159i
907	813	0	0	0	0
813	814	0	0-0.002i	0.001+0.0i	0.001-0.003i
813	810	0+0.002i	0	0	0
810	811	0+0.002i	0-0.002i	0.001+0.001i	0-0.003
810	818	-0.002+0.027i	0.002-0.014i	-0.001+0.031i	0.002-0.001i
818	801	-0.002+0.006i	0.002-0.004i	-0.002+0.008i	0.001-0.002i
801	802	-0.001-0.001i	-0.001+0.002i	-0.001-0.00i	0
801	826	0.001+0.002i	-0.001+0.006i	0.001+0.001i	0.001-0.001i
826	840	0	0-0.001i	0	0
826	822	0.006+0.062i	-0.004-0.044i	0.007+0.067i	-0.003-0.023i
822	801	0.003+0.041i	-0.001-0.027i	0.003+0.045i	0-0.012i

Показано, що врахування реальних можливостей РП та чутливості втрат потужності в електричних мережах до збурень дозволяє підвищити ефективність оптимального керування режимами ЕЕС. Застосування натурно-імітаційної моделі в складі автоматизованої системи керування дозволило її вдосконалити, адаптувавши до реальних умов експлуатації. Для визначення, наскільки ефективніше вона стала в результаті такого вдосконалення, використовується методика оцінки якості функціонування САК. Використання при цьому критеріального моделювання дозволяє порівнювати варіанти функціонування САК, не визначаючи їх техніко-економічних показників.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуальної задачі компенсації негативного впливу неоднорідності електричних мереж енергосистеми, що полягає у вдосконаленні математичних моделей та формуванні умов оптимальності режимів ЕЕС з врахування чутливості втрат активної потужності у вітках її схеми до збурень у вузлах.

1. Показано, що заходам по компенсації негативного впливу неоднорідності ЕЕС повинен передувати аналіз параметричної чутливості, за результатами якого виявляються місця, до змін параметрів в яких критерій оптимальності – втрати активної потужності є найбільш чутливим. Врахування параметричної чутливості в процесі оптимального керування режимами ЕЕС з метою компенсації неоднорідності електричних мереж, дозволяє підвищити його ефективність і забезпечити зменшення втрат електроенергії в ЕЕС.

2. Показано, що результати компенсації негативного впливу неоднорідності електричних мереж залежать від розрахункових умов та від збурень у вузлах схеми ЕЕС. Для підвищення ефективності оптимального керування нормальними режимами ЕЕС і зменшення в них додаткових втрат електроенергії необхідно враховувати чутливість оптимальних рішень по компенсації неоднорідності від збурень і розрахункових умов.

3. Розроблено метод визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС до збурень у вузлах, що дозволяє відповідним чином ранжувати вітки за значенням втрат в них. Ці результати дозволяють здійснювати заходи по зменшенню втрат електроенергії в електричних мережах з більшою ефективністю.

4. Під час формування умов оптимальності нормальних режимів ЕЕС необхідно враховувати чутливість критерію оптимальності – сумарних втрат потужності в ЕЕС і у вітках схеми до похибок телевимірювань. Це дозволяє зробити оптимізуючі впливи в системі автоматичного керування потоками потужності і напругою в ЕЕС більш адекватними.

5. Для оперативного моніторингу втрат потужності від зміни перетоків, аналізу чутливості елементів ЕЕС та аналізу функціонування систем керування доцільно використовувати натурно-імітаційне моделювання. Розроблена натурно-імітаційна модель для оцінки чутливості втрат потужності в електричних мережах, яка використовується для коригування дій системи автоматичного керування у відповідності зі збуреннями в ЕЕС, в тому числі зі зміною транзитних перетікань, дозволяє підвищити ефективність системи оптимального керування потоками потужності і напругою в ЕЕС.

6. Програмна реалізація моделей та алгоритмів оцінки чутливості втрат потужності до збурень в системі виконана з використанням об'єктно-орієнтованого підходу, завдяки чому створено систематизований перелік моделей і об'єктів, які увійшли в програмний комплекс аналізу чутливості й оптимізації втрат потужності (АЧП) в ЕЕС. З його допомогою визначаються налагоджувальні параметри САК нормальними режимами ЕЕС.

7. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірена шляхом проведення розрахунків на прикладі реальних ЕЕС. Для підвищення ефективності керування режимами ЕЕС з метою зменшення втрат електроенергії показана необхідність виявляти найбільш слабкі місця в ЕЕС, оцінюючи чутливість втрат потужності до змін навантаження у вузлах. За рахунок відповідного корегування оптимізуючих дій можна зменшити вплив неоднорідності системи більше ніж на 10%. Доповнення програмного комплексу АЧП програмою корекції законів оптимального керування втратами потужності при збуреннях в ЕЕС дозволить підвищити ефективність використання трансформаторів з РПН і додатково знизити втрати електроенергії в мережах енергосистеми на 0,5-0,7%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лесько В. О. Моделювання автоматизованої системи оптимального управління потоками потужності в ЕЕС засобами TRACE MODE / П. Д. Лежнюк, О. Ф. Гончарук, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2003. – № 6. – С. 199 – 203.
2. Лесько В.О. Управление потоками мощности и напряжением в электрических сетях энергосистемы как задача оптимального управления / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Кременчуцького державного політехн. ун-ту. – 2007. – № 4. – С. 75 – 79.
3. Лесько В. О. Критеріальне моделювання якості функціонування автоматичних систем керування / В. О. Комар, В. О. Лесько // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. –2007. –№596. – С. 63–68.
4. Лесько В. О. Чутливість втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи до збурень у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2007. – № 6. – С. 63–67.
5. Лесько В. О. Натурно-імітаційна модель оцінки чутливості втрат потужності в електроенергетичних системах до транзитних перетікань / П. Д. Лежнюк, О. Б. Бурикін, В. О. Лесько // Інформаційні технології та компютерна інженерія. – 2008. – № 1(11). – С. 83 – 87.
6. Лесько В. О. Чутливість втрат потужності в електроенергетичних системах до зміни транзитних перетікань / П. Д. Лежнюк, О. Б. Бурикін, В. О. Лесько // Наукові праці ВНТУ. Зміст випуску № 1 (2008). http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1/uk.files/08lpdstc_uk.pdf.
7. Лесько В. О. Врахування якості функціонування розподільних систем під час їх реконструкції / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, В. О. Лесько, А. Л. Поліщук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – № 3(56). – С. 172 – 174.

АНОТАЦІЯ

Лесько В. О. Оцінка чутливості втрат потужності в неоднорідних електричних мережах до збурень у вузлах – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2009.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів та засобів, які направлені на підвищення точності визначення втрат активної потужності у заданих елементах електроенергетичної системи (ЕЕС). В роботі показано, що підвищення точності визначення втрат активної потужності від збурень у вузлах дасть змогу підвищити ефективність контролю за ними та більш обґрунтовано планувати заходи з їх зменшення, що є важливою задачею в умовах балансуєчого ринку, який впроваджується в Україні.

В роботі показано, що заходам з компенсації негативного впливу неоднорідності ЕЕС на значення втрат електроенергії під час її транспортування, зокрема адресного, повинен передувати аналіз параметричної чутливості, за результатами якого виявляються місця, до змін параметрів в яких критерій оптимальності – втрати активної потужності – є найбільш чутливим. Врахування параметричної чутливості в процесі оптимального керування режимами ЕЕС дозволяє підвищити його ефективність і забезпечити зменшення втрат електроенергії в ЕЕС.

Ключові слова: електроенергетична система, нормальний режим, взаємовплив, чутливість, збурення, оптимальне керування.

АННОТАЦИЯ

Лесько В. О. Оценка чувствительности потерь мощности в неоднородных электрических сетях к возмущениям в узлах – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2009.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и способов, какие направлены на повышение точности определения потерь активной мощности в заданных элементах электроэнергетической системы (ЭЭС). В работе показано, что повышение точности определения потерь активной мощности от возмущений в узлах даст возможность повысить эффективность контроля над ними и более обосновано планировать мероприятия по их уменьшению, что является важной задачей в условиях балансирующего рынка, который внедряется в Украине.

Экономичность процесса транспортировки электроэнергии зависит от многих факторов, одним из которых есть мера оптимума нормальных режимов ЭЭС. Оптимальное управление нормальными режимами необходимо адаптировать к условиям эксплуатации, которые могут изменяться в течение суток. Эффективная компенсация негативного влияния возмущений на оптимум режимов в неоднородных ЭЭС связана, в первую очередь, с повышением уровня автоматизации оперативно-диспетчерского управления как

важной задачи совершенствования управления ЭЭС с учетом ее чувствительности.

Разработан метод определения матрицы коэффициентов чувствительности потерь мощности в ветках электрических сетей ЭЭС к возмущениям в узлах и показано, что чувствительность потерь мощности в ветках зависит от параметров системы, ее топологии, значений напряжения, в узлах, а также от расчетных условий, в частности место расположения балансирующего узла.

Разработаны алгоритмы практической реализации методов оценки и анализа чувствительности потерь мощности в ветках схемы при небольших возмущениях в узлах ЭЭС, созданная натурно-имитационная модель управления транзитными потоками ЭЭС на основе анализа чувствительности ее элементов. На основе разработанных алгоритмов модифицирован программный комплекс анализа чувствительности и оптимизации нормальных режимов ЭЭС (АЧП) с целью расширения его возможностей для задач анализа и структуризации потерь электроэнергии в ЭЭС.

В работе приведено новое решение актуальной задачи компенсации негативного влияния неоднородности электрических сетей энергосистемы, которая заключается в совершенствовании математических моделей и формировании условий оптимума режимов ЭЭС с учётом чувствительности потерь активной мощности в ветках схемы к возмущениям в узлах.

Также показано, что мероприятиям по компенсации негативного влияния неоднородности ЭЭС на значение потерь электроэнергии во время ее транспортировки, в частности адресной, должен предшествовать анализ параметрической чувствительности, по результатам которого находятся места к изменениям параметров, в которых критерий оптимума – потери активной мощности – является наиболее чувствительным. Учет параметрической чувствительности в процессе оптимального управления режимами ЭЭС позволяет повысить его эффективность и обеспечить уменьшение потерь электроэнергии в ЭЭС.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, нормальный режим, взаимовлияние, чувствительность, возмущение, система автоматического управления, оптимальное управление.

ANNOTATION

Lesko V. O. Estimation to the sensitiveness of losses of power in neodnorodnykh electric networks to indignations in knots – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on specialty 05.14.02 – Electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2009.

Dissertation work is devoted development of methods and methods, what are directed on the increase of exactness of determination of losses of active power in the set elements of the electroenergy system (EES). It is shown in work, that the increase of exactness of determination of losses of active power from indignations in knots will enable to promote control efficiency above them and it is more grounded to plan

measures on their diminishing, which is an important task in the conditions of balancing market which is inculcated in Ukraine.

It is shown in work, that to the measures on indemnification of the negative influencing of neodnorodnosti EES on the value of losses of electric power during its transporting, in particular address, the analysis of parametriceskoy sensitiveness must be preceded, on results which places are to the changes of parameters in which criterion of optimum – losses of active power are most sensible. The account of parametriceskoy sensitiveness in the process of optimum management the modes of EES allows to promote his efficiency and provide diminishing of losses of electric power in EES

Keywords: electric power system, normal mode, interference, sensitive, indignations, optimum management.

Підписано до друку 22.10.2009 р. Формат $29.7 \times 42 \frac{1}{4}$

Наклад 100 прим. Зам. № 2009-179

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59