

УДК 621.316

В. Л. Прихно, канд. техн. наук;**П. О. Черненко**, канд. техн. наук;**В. В. Трубіцин**, асп.

ЗАДАЧА УСУНЕННЯ ПОРУШЕННИХ ОБМЕЖЕНЬ НА ДІАПАЗОН ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА «ПОРАДНИКА ДИСПЕТЧЕРА»

Наведено опис алгоритму оптимального усунення допустимих величин параметрів режиму енергосистеми, таких як рівні напруг на шинах електростанцій і підстанцій, струми у лініях електропередач, трансформаторів та автотрансформаторів, а також активних потужностей заздалегідь визначених перерізів.

Вступ

Актуальним напрямком розвитку АСДУ є розробка програмних засобів, орієнтованих на підтримку прийняття рішень диспетчерами енергосистем. Традиційно програми такого призначення об'єднують загальною назвою «Порадник диспетчера». У найзагальніших рисах ці засоби повинні здійснювати: контроль поточного режиму; прогнозування розвитку режимних ситуацій; завчасне виявлення негативних тенденцій; перевірку наслідків виникнення імовірних аварійних ситуацій; пошук оптимальних шляхів усунення вже виниклих проблем; пошук впливів, спрямованих на недопущення розвитку негативних процесів і аварійних ситуацій.

Широкого застосування, в основному в закордонних АСДУ, набула функція оцінки надійності за критерієм термічної стійкості елементів мережі. Оцінка допустимості можливих післяаварійних режимів проводиться за певного, заздалегідь заданого, переліку аварійних порушень — відключенні деяких генераторів, ліній та трансформаторів. З метою запобігання можливому небезпечному перевантаженню елементів мережі диспетчер приймає міри з перерозподілу потоків активної та реактивної потужностей і підтримки допустимих рівнів напруг [1].

Так, наприклад, в [2] описано алгоритм, що формує в перевантаженому режимі поради диспетчеру щодо складу та інтенсивності керувальних впливів. За допомогою програми, яка працює в реальному часі, виявляються райони, в яких внаслідок аварійних відключень виникає перевантажений режим, зумовлений порушенням балансів активної та реактивної потужностей, за номінального значення частоти та допустимих напруг у вузлах навантаження.

Склад та інтенсивність керувальних команд, що визначаються в алгоритмі, формується з урахуванням допустимої швидкості реалізації резервів потужності і за відсутності в енергорайоні оперативних резервів потужності, які можна реалізувати досить швидко, приймається рішення про відключення частини навантаження.

В запропонованому в [3] алгоритмі контролю недопустимого порушення режиму за напругою у вузлах розрахункової схеми виявляється енергорайон с дефіцитом реактивної потужності, мобілізуються резерви реактивної потужності та визначається першочерговість необхідних керувальних впливів для забезпечення відновлення нормального режиму без обмежень за напругою. В разі відсутності резервів реактивної потужності для відновлення нормальних рівнів напруги в контрольованих вузлах визначаються рекомендації щодо зниження напруги на нижній стороні трансформаторів — друга черга керувальних впливів.

В цій статті розглядається комплексна проблема усунення недопустимих величин параметрів режиму: рівнів напруг на шинах станцій і підстанцій; струмів у лініях електропередач, трансформаторів та автотрансформаторів; активних потужностей заздалегідь визначених перетинів (груп ліній). В цьому випадку порушені обмеження можуть або реально існувати в поточному режимі, або їх виникнення очікуються у разі розвитку режимної ситуації. Незалежно від того, є ситуація реальною чи очікуваною, задача полягає в пошуку оптимальної стратегії ліквідації порушених обмежень. Часто цю задачу називають введенням в допустиму область.

© В. Л. Прихно, П. О. Черненко, В. В. Трубіцин, 2011

Наявність програми введення в допустиму область у складі «порадника диспетчера» дозволяє: оцінити можливість забезпечення нормального режиму; зіставити рекомендовані рішення з інструктивними або прийнятими на основі професійного досвіду роботи, а також оцінити ефективність власних і рекомендованих рішень.

Опис алгоритму

За наявності порушених обмежень щодо контрольованих параметрів цільова функція, яку слід мінімізувати, може бути подана у вигляді суми модулів штрафних додатків:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \left| U_{i_{\min/\max}} - U_i \right| + \sum_{j=1}^m \left| P_{j_{\min/\max}} - P_j(X) \right| + \sum_{k=1}^l \left| I_{k_{\max}} - I_k(X) \right|, \quad (1)$$

де X — вектор незалежних змінних; n — кількість порушених обмежень за рівняннями напруг вузлів; U_i — розраховане значення напруги у вузлі з i -м порушеним обмеженням; $U_{i_{\min/\max}}$ — значення i -го порушеного обмеження за напругою; m — кількість порушених обмежень за потоками активних потужностей в перетинах; $P_j(x)$ — розрахований потік потужності в перерізі з j -м порушеним обмеженням; $P_{j_{\min/\max}}$ — значення j -го порушеного обмеження потоку активної потужності в перерізі; l — кількість порушених обмежень із завантаження гілок за струмом; $I_k(x)$ — розрахований струм у гілці з k -м порушеним обмеженням; $I_{k_{\max}}$ — значення k -го порушеного обмеження за струмом у гілці.

Порушені обмеження усуваються диспетчером енергосистеми за допомогою: зміни завантаження джерел активної і реактивної потужностей; перемикання положення анцапф трансформаторів поздовжнього або поздовжньо-поперечного регулювання; включення або відключення реакторів і, в крайньому випадку, обмеження споживачів електроенергії. При цьому змінювати завантаження джерел активної та реактивної потужностей можна лише в межах робочих діапазонів регулювання генераторів і синхронних компенсаторів (без пусків і зупинок обладнання). Обмеження споживачів допускається лише з використанням заздалегідь визначеного графіка аварійних відключень (ГАВ). Кожна послідовність аварійних відключень характеризується величинами зниження споживання активної та реактивної потужностей індивідуально для кожного з вузлів групи обмежень. За умовами задачі вважається, що залучення споживачів до усунення порушених обмежень допускається лише у тих випадках, коли інші засоби вичерпані, а потрібний результат не досягнуто.

Систему обмежень задачі складають рівняння балансів активних і реактивних потужностей у вузлах, а також потоків активних потужностей в перерізах та струмів у гілках схеми заміщення:

$$\begin{cases} U_{\text{вузл}_{\min}} \leq U_{\text{вузл}} \leq U_{\text{вузл}_{\max}}; \\ P_{\text{вузл}}(X) = P_{\text{вузл}_{\text{зад}}}; \\ Q_{\text{вузл}}(X) = Q_{\text{вузл}_{\text{зад}}}; \\ P_{\text{сеч}_{\min}} \leq P_{\text{сеч}}(X) \leq P_{\text{сеч}_{\max}}; \\ I_{\text{вет}} \leq I_{\text{вет}_{\max}}. \end{cases} \quad (2)$$

Під час розрахунків режимів енергосистем в якості незалежних змінних застосовуються модулі і фази напруг вузлів. Для розв'язання цієї задачі пропонується розширити склад незалежних змінних за рахунок параметрів регулювання. Таким чином у коло незалежних параметрів оптимізації будуть входити такі змінні: U , ϕ — модулі напруг і фази напруг у вузлах заступної схеми; P_g , Q_g — генерації активної і реактивної потужності; Q_p — реактивні потужностей реакторів; K' , K'' — поздовжні і поперечні складові комплексних коефіцієнтів трансформації; S_H — навантаження активних і реактивних потужностей споживачів відповідно до заздалегідь визначених черг.

Очевидно, реактивні потужності нерегульованих реакторів змінюються дискретно, оскільки пов'язані зі зміною їх стану (вони або включені, або відключені). Аналогічно, залучення до регулювання деякої послідовності обмежень споживачів веде до дискретної зміни навантаження ни-

зки вузлів (що входять в цю послідовність). Проте, з урахуванням застосовуваного математичного апарата визнано доцільним відповідні величини вважати такими, що змінюються безперервно. При цьому в алгоритмі мінімізації повинні бути передбачені рішення, що перешкоджають набуванню змінними проміжного стану всередині регульовального діапазону.

У системі обмежень задачі (2) обмеження першої групи — на діапазон зміни напруг у вузлах — є простими, оскільки модулі напруг входять безпосередньо в незалежні параметри оптимізації. Два останніх обмеження мають вигляд нерівностей. З точки зору програмної реалізації їх доцільно звести до рівностей, додавши балансні змінні. У разі такого підходу балансні величини включаються до числа незалежних змінних, на діапазон зміни яких накладаються двосторонні обмеження.

Таким чином, система обмежень розпадається на дві групи. У першу, що має вигляд рівності, входять рівняння балансів вузлових потужностей, потоків в перерізах та струмів:

$$\begin{cases} P_{\text{узл}}(X) = P_{\text{узл}}^{\text{зад}}; \\ Q_{\text{узл}}(X) = Q_{\text{узл}}^{\text{зад}}; \\ P_{\text{сеч}}(X) + P_{\text{сеч}}^{\text{бал}} = P_{\text{сеч}}^{\text{макс}}; \\ I_{\text{вет}}(X) + I_{\text{вет}}^{\text{бал}} = I_{\text{вет}}^{\text{макс}}, \end{cases} \quad (3)$$

де $P_{\text{сеч}}^{\text{бал}}$ — балансні змінні перерізів; $I_{\text{вет}}^{\text{бал}}$ — балансні змінні струмів.

У другу групу входять обмеження, що накладаються безпосередньо на незалежні змінні:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U \leq U_{\max}; \\ P_{\Gamma_{\min}} \leq P_{\Gamma} \leq P_{\Gamma_{\max}}; Q_{\Gamma_{\min}} \leq Q_{\Gamma} \leq Q_{\Gamma_{\max}}; \\ Q_{p_{\min}} \leq Q_p \leq Q_{p_{\max}}; \\ K'_{\min} \leq K' \leq K'_{\max}; K''_{\min} \leq K'' \leq K''_{\max}; \\ S_{H_{\min}} \leq S_H \leq S_{H_{\max}}; \\ P_{\text{сеч}_{\min}} - P_{\text{сеч}}^{(0)} \leq P_{\text{сеч}}^{\text{бал}} \leq P_{\text{сеч}_{\max}} - P_{\text{сеч}}^{(0)}; \\ -I_{\text{вет}}^{(0)} \leq I_{\text{вет}}^{\text{бал}} \leq I_{\text{вет}_{\max}} - I_{\text{вет}}^{(0)}. \end{cases} \quad (4)$$

У загальному випадку діапазон зміни незалежних величин визначається двосторонніми нерівностями

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}.$$

Внаслідок нелінійних залежностей вузлових потужностей, потоків в перетинах та струмів у гілках від незалежних змінних нелінійними є як цільова функція (1), так і система обмежень (2). У зв'язку з цим для мінімізації цільової функції доцільно використовувати ітераційний алгоритм, що припускає послідовну заміну нелінійних залежностей лінійними. У результаті таких замін на кожній ітерації обчислювального процесу має розв'язуватись задача мінімізації лінійної цільової функції з лінійними обмеженнями.

Потоки активних і реактивних потужностей по гілках, як і струми, залежать від модулів і фаз напруг вузлів, що обмежують ці гілки, а також від власних коефіцієнтів трансформації (у випадках, коли є можливість їх зміни). У зв'язку з цим лінеаризація відповідних залежностей для k -ї гілки, обмеженої вузлами i та j , виконана на початку деякої ітерації, буде мати вигляд

$$\begin{aligned} P_k &= P_k^{(0)} + \frac{\partial P_k}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial P_k}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial P_k}{\partial U_j} \Delta U_j + \frac{\partial P_k}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j + \frac{\partial P_k}{\partial K'_k} \Delta K'_k + \frac{\partial P_k}{\partial K''_k} \Delta K''_k; \\ Q_k &= Q_k^{(0)} + \frac{\partial Q_k}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial Q_k}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial Q_k}{\partial U_j} \Delta U_j + \frac{\partial Q_k}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j + \frac{\partial Q_k}{\partial K'_k} \Delta K'_k + \frac{\partial Q_k}{\partial K''_k} \Delta K''_k; \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_k = I_k^{(0)} + \frac{\partial I_k}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial I_k}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial I_k}{\partial U_j} \Delta U_j + \frac{\partial I_k}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j + \frac{\partial I_k}{\partial K'_k} \Delta K'_k + \frac{\partial I_k}{\partial K''_k} \Delta K''_k.$$

Наведені співвідношення стосуються лінеаризації залежностей потоків і струмів з боку вузла початку гілки i . Залежності потоків і струмів за кінцями гілки (з боку вузла j) повністю симетричні.

Вузлова потужність визначається підсумовуванням потоків за приєднаними до вузла гілками. У зв'язку з цим рівняння балансів вузлових потужностей будуть мати вигляд

$$P_i^{(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial U_i} \Delta U_i + \sum_{k=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial U_j} \Delta U_j \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial K'_k} \Delta K'_k \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial K''_k} \Delta K''_k \right) - P_{i_{ген}} + P_{i_{нагр}} = 0, \tag{6}$$

де n — число гілок, приєднаних до i -го вузла; $P_i^{(0)}$ — значення потужності в i -му вузлі, розраховане на початку деякої ітерації; $P_{i_{ген}}$ — задана, або регульована, генерація в i -му вузлі; $P_{i_{нагр}}$ — задане навантаження в i -му вузлі, з урахуванням задіяних черг обмежень.

Лінеаризоване рівняння балансу реактивної потужності вузла за структурою повністю ідентичне виразу (6).

Потік потужності по i -му перерізу розраховується шляхом підсумовування потоків активних потужностей за гілками, що входять в цей переріз.

$$P_i^{(0)} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial U_i} \Delta U_i \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial U_j} \Delta U_j \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial \phi_j} \Delta \phi_j \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial K'_k} \Delta K'_k \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_k}{\partial K''_k} \Delta K''_k \right) + \Delta P_{i_{бал}} = P_{i_{max}}, \tag{7}$$

де n — кількість гілок, що входять до i -го перерізу; $P_i^{(0)}$ — значення потоку активної потужності по i -му перерізу, розраховане на початку деякої ітерації; $\Delta P_{i_{бал}}$ — приріст балансної змінної i -го перерізу; $P_{i_{max}}$ — максимально допустимий потік по i -му перерізу.

Вираз (1) у загальному вигляді характеризує цільову функцію задачі. Після того, як були введені додаткові балансні змінні, система обмежень задачі перетворилася на набір рівностей. У результаті порушеними можуть бути лише межі зміни деяких незалежних величин, в тому числі — балансних, введених у рівняння, що обмежують потоки активних потужностей в перерізах і струмів в гілках. З цієї причини тепер, після перетворень, повинні накладатися штрафи на перевищення граничних значень незалежних змінних, а не функцій від них. У результаті цільова функція задачі може бути подана у вигляді добутку двох векторів:

$$F(X) = C^T (X - X_{min/max}), \tag{8}$$

де $X_{min/max}$ — вектор порушених обмежень незалежних змінних (мінімальних чи максимальних граничних величин); C — вектор штрафних коефіцієнтів: $c_i = -1$ — порушено нижнє обмеження i -ї змінної; $c_i = +1$ — порушено верхнє обмеження i -ї змінної; $c_i = 0$ — обмеження i -ї змінної не порушено.

Якщо у виразі (8) розкрити дужки, то

$$F(X) = C^T \cdot X - C^T \cdot X_{min/max} = C^T \cdot X - F'.$$

F' є величиною постійною і не впливає на оптимізацію. У зв'язку з цим процес усунення порушених обмежень зводиться до мінімізації цільової функції

$$F(X) = C^T \cdot X. \tag{9}$$

У свою чергу, якщо на початку деякої ітерації незалежні змінні приймають значення $X^{(0)}$, то $X = X^{(0)} + \Delta X$ й функція (9) перетворюється до вигляду

$$F(X) = C^T \cdot X = C^T (X^{(0)} + \Delta X) = C^T \cdot \Delta X + F''.$$

У кінцевому рахунку, оскільки F'' — постійна величина, то на кожній ітерації слід мінімізувати цільову функцію:

$$F(X) = C^T \cdot \Delta X. \quad (10)$$

З урахуванням (5), (6) і (7) систему обмежень можна подати у вигляді (11)

$$A \cdot \Delta X = B, \quad (11)$$

де A — матриця коефіцієнтів системи обмежень розмірністю $m \times n$ (m — кількість рівнянь в системі обмежень; n — кількість незалежних змінних); B — вектор небалансів розмірності m .

Вектор приростів ΔX так само, як і вектор незалежних змінних, обмежений як зверху, так і знизу:

$$\Delta X_{\min} \leq \Delta X \leq \Delta X_{\max}. \quad (12)$$

Вектор B у формулі (11) має ненульові компоненти лише в рядках, що відповідають рівнянням балансу потужностей у вузлах. Для рівнянь, що відповідають потокам потужності в перерізах, небаланс беруть на себе балансні змінні. Відповідно до рівняння (6)

$$b_j = P_{i_{\text{ген}}} - P_{i_{\text{нагр}}} - P_i^{(0)};$$

$$b_k = Q_{i_{\text{ген}}} - Q_{i_{\text{нагр}}} - Q_i^{(0)},$$

де j — номер рядка матриці коефіцієнтів, який відповідає рівнянню балансу активної потужності в i -му вузлі; k — номер рядка матриці коефіцієнтів, який відповідає рівнянню балансу реактивної потужності в i -му вузлі.

Необхідно відмітити, що задані діапазони зміни незалежних параметрів повинні витримуватися в процесі оптимізації. Якщо ж до початку процесу оптимізації будь-який параметр виходить за допустимий діапазон, для нього мають бути встановлені тимчасові обмеження, що діють допоки параметр не буде введений в допустиму область.

Для мінімізації лінійної цільової функції (10) з обмеженнями (11) і (12) може бути застосований симплекс-метод, традиційний для розв'язання задач лінійного програмування [4]. Однак базовий варіант має бути істотно модифікований з метою урахування специфіки розв'язуваної задачі.

Програма введення режиму в допустиму область включена до складу програмного комплексу КОСМОС, призначеного для виконання оперативних розрахунків режимів енергосистем на основі телеметричної інформації. Досвід численних розрахунків показав ефективність запропонованого математичного апарату. Проте широкому впровадженню програми перешкоджає відсутність діалогових засобів, що забезпечують інтерпретацію результатів. З цієї причини технолог буває не в змозі пояснити причину вибору тих чи інших керувальних впливів, що знижує довіру до отриманих результатів. Не завжди буває очевидним, на усунення яких обмежень, в першу чергу, були спрямовані ті чи інші дії. У зв'язку зі сказаним для усунення зазначених недоліків найближчим часом передбачається розробка засобів інтерактивної взаємодії програми з технологом безпосередньо в процесі розв'язання задачі.

Перш за все, у разі запуску програми технолог повинен бути наданий повний перелік параметрів, значення яких в поточному режимі вийшли за допустимі межі. Доцільно на підставі цього переліку, відсортованого в порядку зменшення відхилень від граничних величин, сформулювати та подати в графічному вигляді епюри зазначених обмежень, окремо за напругами, струмами в гілках і потоками активних потужностей в перерізах. Далі технолог повинна бути надана можливість після оцінки всього списку виділити ті параметри, значення яких повинні бути введені в допустиму область в першу чергу. Для інших, невиділених параметрів списку, в процесі розрахунку значення не повинні збільшувати відхилення від зазначених обмежень.

На кожному кроці обчислювального процесу, пов'язаному з вибором провідної змінної, тех-

нологу повинен бути запропонований не тільки найбільш ефективний вплив, але і показані альтернативні варіанти, ефективність яких порівнюється з найкращим. Далі, за бажанням технолога, програма повинна розрахувати і продемонструвати наслідки реалізації кожного із запропонованих варіантів. При цьому для наочності вибір керувальних впливів повинен супроводжуватися зміною епюр зазначених обмежень.

Висновки

1. Задача пошуку оптимальних варіантів введення режиму в допустиму область повинна розглядатися як невід’ємна складова частина програмного комплексу, орієнтованого на підтримку рішень диспетчера.

2. Для розв’язання задачі введення в допустиму область доцільно використовувати модифікований симплекс-метод лінійного програмування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольденберг Ф. Д. Новые технологии в диспетчерском управлении энергосистемой Израиля / Ф. Д. Гольденберг // Сборник докладов. Управление электроэнергетическими системами новые технологии и рынок. РАН Уральское отделение Коми научный центр Институт социальных–экономических и энергетических проблем Севера. — Сыктывкар, 2005. — С. 123—132.
2. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / под общей ред. Ю. Н. Руденко и В. А. Семенова. — М. : Издательство МЭИ, 2000.
3. Krogh D. Multy-stage rescheduling of generation, load shedding and short-term transmission capacity for emergency state control / D. Krogh, S. H. Javid // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1983. — Vol. PAS-102. — No. 5. — P. 1466—1472.
4. Муртаф Б. Современное линейное программирование / Б. Муртаф. — М. : Мир, 1984. — 224 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 2.02.11
Рекомендована до друку 9.02.11

Прихно Віталій Леонідович — старший науковий співробітник, **Черненко Павло Олексійович** — доцент, **Трубіцин Віталій Володимирович** — аспірант.

Інститут електродинаміки НАН України, відділ моделювання електроенергетичних об’єктів і систем, Київ