

УДК 621.316.1

В.В.ЗОРІН, докт.техн.наук (НТТУ "КП", Київ), М.Й.БУРБЕЛО, докт.техн.наук, А.М.ВОЛОЦЬКИЙ (Вінницький нац.техн.ун-т, Вінниця)

Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруг

В статті проаналізовано взаємні впливи оптимальних розв'язків задач зменшення несиметрії та відхилень напруг і статичних характеристик вузла навантажень під час впровадження багатофункціональних коректуючих пристроїв.

В статье проанализированы взаимные влияния оптимальных решений задач уменьшения несимметрии и отклонений напряжений и статических характеристик узла нагрузок при внедрении многофункциональных корректирующих устройств.

Вступ. Розвиток математичного програмування обумовив використання математичних моделей для параметричного синтезу коректуючих пристроїв (КП) покращення якості електричної енергії [1]. Такий підхід надає широкі можливості для врахування багатьох взаємопов'язаних факторів (енергетичних, економічних, технологічних та ін.), які можуть знайти відображення у відповідних функціях цілі та обмеженнях. Якщо мова йде про випробувані математичні моделі, то їх розв'язок дозволяє отримати оптимальне, в деякому сенсі, рішення, яке інтерпретується як оптимальні параметри КП. Після цього виникає задача визначення дійсних параметрів КП за каталожними даними, які ї повинні бути реалізовані. Коли ж використовуються нові, або спрощені математичні моделі (наприклад, лінійні зі збереженням адекватності), то перш ніж перейти до впровадження отриманих розв'язків, виникає необхідність проаналізувати їх на предмет ймовірних негативних впливів на основні параметри режиму системи електропостачання та на вузли навантажень, до яких приєднуються синтезовані КП.

Задача аналізу впливів КП на параметри режиму електричної мережі була сформульована та вирішена в [1] як задача стійкості оптимальних розв'язків.

Аналіз впливу КП на вузли навантажень пов'язується з аналізом статичної стійкості вузлів та з побудовою відповідних статичних характеристик реактивної потужності навантажень. Останнє викликано тим, що КП є пристроями, які базуються на використанні реактивних елементів (ємнісних

або індуктивних).

Постановка завдання. Ставиться задача аналізу взаємного впливу прийнятих рішень при оптимізації якості електроенергії на статичні характеристики вузла навантажень і, навпаки, статичних характеристик на неточність симетрування навантажень.

Обґрунтування результатів дослідження. Відомо [4], що при незмінному складі навантажень в системі електропостачання споживані активна та реактивна потужності є функціями напруги на шинах живлення $P=f_p(U)$, $Q=f_Q(U)$. З іншого боку, приєднання до вузла ємнісних КП дає $Q=Q_K(U^2)$. Враховуючи той факт, що конденсаторні установки генерують реактивну потужність в мережу, їх регулюючий ефект можна оцінити таким чином $dQ_K/dU=2Q_K/U$.

Фізично похідна dQ_K/dU характеризує реакцію системи на зміну напруги у даному вузлі. У випадку від'ємності цієї похідної, зниження напруги пов'язано із збільшенням споживання реактивної потужності у даному вузлі і збільшенням потоку реактивної потужності від системи в даний вузол, що, зазвичай, призводить до встановлення усталеного значення напруги і ототожнюється із стійкістю. Однак в деяких випадках за різкого зниження напруги має місце порушення стійкості вузла навантаження. Приєднання ємнісних КП до вузлів навантажень (особливо, коли останні використовуються ще й для підтримання необхідного рівня напруги) призводить до зменшення запасу стійкості вузла навантажень. Слід підкреслити, що ці мірку-

вання в більшій мірі стосуються нерегульованих КП. У разі використання регульованих КП за автоматичного їх регулювання забезпечується достатньо широкий діапазон зміни реактивної потужності, необхідний для підтримання контрольованого рівня напруги. Однак, при оцінці стійкості вузла навантаження (а, в деяких випадках, і системи в цілому) з КП конденсаторного типу слід враховувати характеристики останніх при постійності їх параметрів і незмінній кількості секцій батарей [4]. Тут рекомендується не враховувати можливості регулювання, через те, що перемикання окремих секцій може відбуватися після зміни напруги на неконтрольовану величину.

Зробимо ще одне зауваження. Воно стосується того, що врахування негативного впливу КП, приєднаних до вузлів навантаження систем електропостачання (стійкість вузлів навантаження), можна здійснювати на етапі проектування під час побудови математичних моделей параметричного синтезу КП покращення якості електроенергії, або на етапі впровадження перед безпосереднім вибором параметрів конкретного пристрою.

На етапі проектування ступінь порушення стійкості вузлів навантаження можна відстежити і задати за допомогою введення у обрану математичну модель додаткових обмежень на коефіцієнт запасу стійкості [2].

На стадії впровадження, тобто коли знайдені оптимальні параметри і настає черга процесу каталожного підбору елементів КП, оцінити ступінь впливу введеної реактивної потужності на режим напруги доцільно за допомогою дослідження статичних характеристик вузлів навантажень $P=f_P(U)$, $Q=f_Q(U)$.

Алгоритм оцінки взаємовпливу статичних характеристик та оптимальних рішень доцільно проаналізувати на числовому прикладі, скориставшись, наприклад, умовою задачі з [1] як достатньо характерною: симетричне навантаження $S_{\Sigma}=10+j9$ МВА та однофазне $S_{BC}=2,5+j1$ МВА живляться від шин 10,5 кВ трансформатора трансформаторної підстанції 35/10 кВ, що характеризується комплексним опором $Z=0,378+j0,996$ Ом. Значення струмів фаз на стороні 10 кВ будуть $I_A=662 e^{-j45^\circ}$ А, $I_B=814 e^{-j155^\circ}$ А, $I_C=856 e^{j72^\circ}$ А. Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2U}=2,3\%$.

Для узагальнення виконаємо оцінку ступеня впливу статичних характеристик на неточність симетрування режиму вузла навантажень (неточність підбору параметрів КП), скориставшись при цьому аналізом значень коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} , прийнявши діапазон його зміни у межах від 0,5 до 1 %. Зворотний вплив прийнятих рішень при виборі КП на статичні характеристики вузла навантажень будемо характеризувати відхиленням напруги прямої по-

слідковності від номінального значення, яке не повинно перевищувати 5 %.

Розглянемо один з найбільш вдалих, на наш погляд, підходів до здійснення подібного дослідження, який оснований на представленні статичних характеристик степеневими залежностями потужностей фаз від напруги на шинах навантаження [3]. Статичні характеристики навантажень будуть описані такими виразами (за умовою задачі однофазне навантаження приєднано до фаз В і С):

$$S_{BC}(k_P, k_Q) = P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_P} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{CA}(k_P, k_Q) = P_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_P} + jQ_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{AB}(k_P, k_Q) = P_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_P} + jQ_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{\text{ном}}} \right)^{k_Q};$$

де $P_{BC}, Q_{BC}, P_{CA}, Q_{CA}, P_{AB}, Q_{AB}$ — відповідні активні та реактивні міжфазні потужності навантажень BC, CA, AB ; U_{BC}, U_{CA}, U_{AB} — фактичне значення міжфазних напруг BC, CA, AB у вузлі навантажень; $U_{\text{ном}}$ — номінальне значення напруги мережі; k_P, k_Q — характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги (приймаємо діапазон їх зміни в таких межах: $k_P=0...2, k_Q=0...4$).

Оптимізація несиметричного режиму виконувалась за використання таких умов [1]:

$$Z(x) \rightarrow \min,$$

$$U_2(x) \leq bU_1, \quad (1)$$

$$x \geq 0,$$

де $Z(x)$ — розрахункові витрати на КП; $U_2(x)$ — напруга зворотної послідовності у вузлі навантаження; U_1 — напруга прямої послідовності у вузлі навантаження; b — наперед прийняте порогове значення; x — вектор керованих змінних (параметри КП, виконаного за схемою несиметричного трикутника реактивних елементів).

Залежності коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю і напруги прямої послідовності (рис. 1, а та б) побудовано як функції k_Q, k_P для ступеня компенсації, що характеризується увімкненням двофазного КП з потужністю фаз $Q_{BC}=1,7$ Мвар, $Q_{CA}=2,0$ Мвар (цифрою 1 на графіках позначено залежність, яку побудовано для $k_P=0$; 2 — для $k_P=1$; 3 — для $k_P=2$).

Характер залежностей коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю від k_P, k_Q (рис.

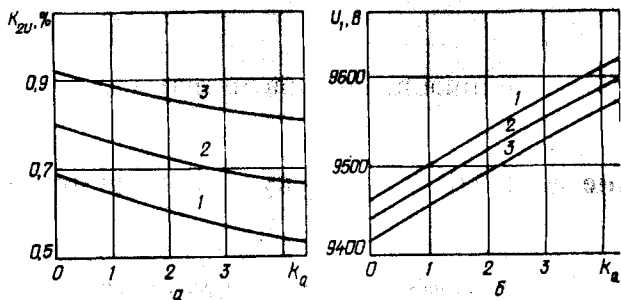


Рис. 1

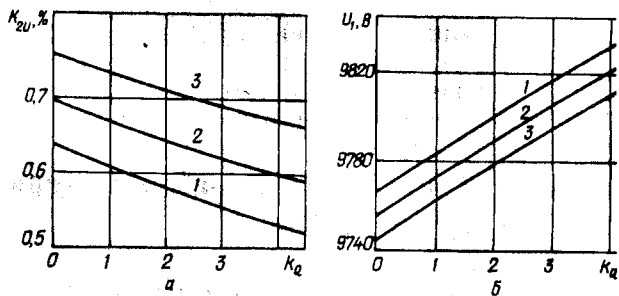


Рис. 2

1, а) зумовлений впливом напруги прямої послідовності, струму зворотної послідовності і повного опору лінії електропередачі та трансформатора. Характер залежностей напруги прямої послідовності (рис. 1, б) визначається ступенем компенсації реактивної потужності і реактивним опором лінії та трансформатора. Як видно з рис. 1, діапазон зміни K_{2U} знаходиться в межах від 0,53 до 0,91 %, а напруги U_1 — від 9,4 кВ до 9,6 кВ.

У зв'язку з тим, що розв'язок за умовами (1) в останньому випадку не забезпечив необхідний рівень напруги у вузлі навантажень (відхилення напруги не повинно перевищувати 5 %), то виникає необхідність її збільшення до мінімально допустимого значення $U_{\min \text{ доп}}$ з використанням таких умов [5]:

$$\begin{aligned} Z(x) &\rightarrow \min, \\ U_2(x) &\leq bU_1, \\ U_1(x) &\geq U_{\min \text{ доп}} \\ x &\geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

що, зокрема, можна забезпечити шляхом додаткової компенсації реактивної потужності за рахунок збільшення потужності КП.

Залежності коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю і напруги прямої послідовності (рис. 2, а та б) побудовано як функції k_Q, k_P для ступеня компенсації, що характеризується додатковим увімкненням симетричного КП потужністю 3 Мвар. Як видно з рис. 2, діапазон зміни K_{2U} знаходиться в межах від 0,52 до 0,76 %, а напруги U_1 — від 9,75 кВ до 9,83 кВ, що цілком задовольняє умови поставленої задачі.

У разі зниження напруги на шинах джерела живлення вузла навантажень на 2,5% за тих же параметрів двофазного КП значення K_{2U} змінюється в межах від 0,6 до 1,2 %, а діапазон зміни U_1 знаходиться в межах від 9,1 кВ до 9,4 кВ. Додаткове увімкнення симетричного КП потужністю 3 Мвар забезпечує зростання напруги прямої послідовності U_1 до 9,4...9,6 кВ, що не задовольняє заданому відхиленню напруги, а діапазон зміни K_{2U} знаходиться в межах 0,6...1,1. Увімкнення симетричного КП потужністю 4,5 Мвар забезпечує зростання на-

пруги прямої послідовності U_1 до 9,5...9,7 кВ, що задовольняє заданому відхиленню напруги, а діапазон зміни K_{2U} звужується і знаходиться в межах 0,6...1,0, що також відповідає заданому значенню цього коефіцієнта.

Таким чином, можна констатувати, що вплив статичних характеристик на оптимальні розв'язки можна істотно зменшити з використанням умов (2) завдяки регулюванню напруги у вузлі навантажень електричної мережі.

Підсумовуючи, можна також відзначити, що наведений алгоритм аналізу взаємовпливів доцільно застосовувати особливо за використання невипробованих математичних моделей параметричного синтезу КП покращення якості електричної енергії.

Висновки. Проведений аналіз статичних характеристик вузла навантажень з багатофункціональним КП дозволяє зробити висновок про їх взаємовпливи на оптимальні розв'язки та навпаки. Це, в свою чергу, говорить про те, що під час каталожного підбору параметрів КП необхідно враховувати ці впливи, оскільки їх неврахування може призвести до збільшення несиметрії або відхилень напруг на неконтрольоване значення. Такий аналіз доцільний під час синтезу багатофункціональних КП ємнісного типу, призначених для оптимізації будь-яких параметрів якості електроенергії.

1. Авакумов В.Г., Волоцкий А.М. Области устойчивости при оптимизации качества электроэнергии // Электричество. — 1980. — №8. — С. 55—57.

2. Авакумов В.Г., Волоцкий А.М. О постановке ограниченной по устойчивости узлов нагрузки в задачах оптимального проектирования устройств с использованием силовых реактивных элементов / "Методы и средства повышения эффективности устройств преобразовательной техники". — К.: Наук. думка, 1981. — С. 69—72.

3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1981. — 209 с.

4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. — М.: Энергия, 1979. — 456 с.

5. Зорин В.В., Волоцкий А.М. Параметрический синтез корректирующих устройств для оптимизации несимметричного режима и регулирования напряжения в узле нагрузки / "Электрические сети и системы". — К.: Вища школа, 1984. — Вып. 20. — С. 44—50.

Надійшла 21.04.2008