

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЬОВ, І.В. СТАСЮК

ДО ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Мета. Метою статті є дослідження впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму і стійкість електричної систем, встановлення допустимих рівнів компенсації реактивної потужності на стійкість вузлів навантаження і синхронних генераторів, дослідження області самозбудження синхронного генератора при компенсації реактивної потужності. **Методика.** Для проведення досліджень використовувалися математичні моделі електричної системи у вигляді вузлових рівнянь, які вирішувалися модифікованим методом Ньютона. Математичне моделювання стійкості вузлів навантаження і синхронних генераторів здійснювалося в пакеті Matlab. **Результати.** Отримано функціональні залежності впливу ступеня компенсації реактивної потужності на параметри режиму електричної системи за схемою "глибокого введення" з урахуванням добової нерівномірності навантаження. Встановлено межі компенсації реактивної потужності в електричних системах з урахуванням стійкої роботи вузлів навантаження і синхронного генератора. Встановлено, що при певному поєднанні параметрів електричної мережі з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора при компенсації реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів можливе порушення статичної стійкості типу самозбудження синхронного генератора. **Наукова новизна.** Встановлено, що в мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора синхронного генератора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може привести до порушення статичної стійкості типу самозбудження. **Практичне значення.** Встановлена техніко-економічна ефективність ступеня компенсації реактивної потужності на параметри режиму електричної системи за схемою "глибокого введення" з урахуванням добової нерівномірності навантаження. Визначено рівні компенсації реактивної потужності навантаження при яких значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному і післяаварійному режимах буде не меншою, ніж мінімальне нормоване значення, а значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і післяаварійному режимах буде не меншим, ніж мінімальне нормоване значення і коефіцієнт потужності генератора повинен бути близький до номінального.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, параметри режиму електричної системи, стійкість вузлів навантаження, стійкість синхронних генераторів, області самозбудження синхронних генераторів.

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЕВ, І.В. СТАСЮК

К ВОПРОСУ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель. Целью статьи является исследование влияния компенсации реактивной мощности на параметры режима и устойчивость электрической систем, установления допустимых уровней компенсации реактивной мощности на устойчивость узлов нагрузки и синхронных генераторов, исследования области самовозбуждения синхронного генератора при компенсации реактивной мощности. **Методика.** Для проведения исследований использовались математические модели электрической системы в виде узловых уравнений, решались модифицированным методом Ньютона. Математическое моделирование устойчивости узлов нагрузки и синхронных генераторов осуществлялось в пакете Matlab. **Результаты.** Получены функциональные зависимости влияния степени компенсации реактивной мощности на параметры режима электрической системы по схеме «глубокого ввода» с учетом суточной неравномерности нагрузки. Установлены границы компенсации реактивной мощности в электрических системах с учетом устойчивой работы узлов нагрузки и синхронного генератора. Установлено, что при определенном сочетании параметров электрической сети с емкостной последовательной компенсацией реактивных сопротивлений цепи статора при компенсации реактивной мощности нагрузки с помощью батарей статических конденсаторов возможно нарушение статической устойчивости типа самовозбуждения синхронного генератора. **Научная новизна.** Установлено, что в сетях с емкостной последовательной компенсацией реактивных сопротивлений цепи статора синхронного генератора, компенсация реактивной мощности нагрузки с помощью батарей статических конденсаторов может привести к нарушению статической устойчивости типа самовозбуждения. **Практическое значение.** Установлена технико-экономическая эффективность степени компенсации реактивной мощности на параметры режима электрической системы по схеме «глубокого ввода» с учетом суточной неравномерности нагрузки. Определены уровни компенсации реактивной мощности нагрузки, при которых значение коэффициента запаса статической устойчивости по напряжению в нормальном и послеаварийном режимах будет не меньше, чем минимальное нормированное значение, а значение коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности в нормальном и послеаварийном режимах будет не меньше, чем минимальное нормированное значение и коэффициент мощности генератора должен быть близок к номинальному.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, параметры режима электрической системы, устойчивость узлов нагрузки, устойчивость синхронных генераторов, области самовозбуждения синхронных генераторов.

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЕВ, І.В. СТАСІУК

ON THE ISSUE OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRICAL SYSTEMS

Purpose. Investigation of the effect of reactive power compensation on the regime parameters and the stability of the electrical system. Determination of the permissible levels of reactive power compensation for the stability of load nodes and synchronous generators. Research of self-excitation area of synchronous generator at compensation of reactive power. **Methodology.** The mathematical models of the electric system in the form of nodal equations, which were solved by the modified Newton method, were used for the research. Mathematical modelling of stability of load nodes and synchronous generators was carried out in Matlab package. **Results.** Functional dependences of the degree of reactive power compensation on the parameters of the regime of the electric system according to the "deep input" scheme taking into account the daily unevenness of the load are obtained. The limits of reactive power com-

compensation in electrical systems are set, taking into account the stable operation of load nodes and synchronous generator. It is established, that at a certain combination of parameters of an electric network with capacitive sequential compensation of reactive resistances of a stator circuit at compensation of reactive power of loading by means of batteries of static capacitors it is possible Violation of static stability of the type of self-excitation of synchronous generator. **Originality.** It is established that in networks with capacitive sequential compensation of reactive resistances of the stator circuit of synchronous generator, compensation of reactive power of loading by means of batteries of static capacitors can lead to violation of static Resistance type of self-excitation. **Practical value.** The technical and economic efficiency of the degree of compensation of reactive power on the parameters of the regime of the electric system according to the "deep input" scheme taking into account the daily unevenness of the load is established. The levels of compensation of reactive power of loading at which the value of a reserve coefficient of static stability on voltage in normal and repairs modes will be not less than the minimum rationed value are determined. The value of the reserve coefficient of static stability on the active power in normal and repairs modes will be not less than the minimum rationed value, and the power factor of the generators should be close to the nominal.

Key words: reactive power compensation, electrical system regime parameters, stability of load nodes, stability of synchronous generators, self-excitation region of synchronous generators.

Вступ. У сучасній електроенергетиці проблема компенсації реактивної потужності (КРП) є однією з основних. Сьогодні і з теоретичної і з практичної точки зору це питання розроблено досить детально [1, 2, 3, 4]. Як правило, вибір засобів КРП (ЗКРП) проводиться на основі розрахунків поточкорозподілу потужностей, рівнів напруги, статичної та динамічної стійкості електричних мереж [5]. Ці розрахунки виконуються для нормальної і для ремонтних схем електричної мережі. Встановлена потужність ЗКРП і необхідний діапазон регулювання визначаються з урахуванням режимів максимальних і мінімальних навантажень енергосистеми в межах доби в літній і зимовий періоди. При виборі ЗКРП враховуються обмеження, встановлені для генераторів за значенням і тривалості споживання ними реактивної потужності. Розрахунок режимів системоутворюючих мереж передбачає еквівалентування навантажень на шинах середньої або нижчої напруги підстанцій. При проектуванні вибір ЗКРП визначається найбільшим рівнем робочої напруги електрообладнання, а при виборі ЗКРП для підвищення пропускної здатності електропередачі підставою є розрахунки статичної та динамічної стійкості.

Для регулювання напруги і перерозподілу реактивної потужності, а також з метою зменшення втрат потужності в розподільчих мережах 110 – 330 кВ важливе значення мають трансформатори і автотрансформатори з пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) [6].

Таким чином, техніко-економічно обгрунтоване використання ЗКРП в електричних мережах 110 – 750 кВ повинно забезпечити підтримку рівнів напруги в допустимих межах; зниження втрат потужності в електричних мережах енергосистем; підвищення пропускної спроможності лінії електропередачі за умовами статичної та динамічної стійкості; підвищення стійкості вузлів навантаження; запобігання «лавини напруги» і, як наслідок, підтримку реактивної потужності генераторів в допустимих межах.

Аналіз літературних джерел. Основи теорії реактивної потужності були розроблені Фрізе [1]. В даний час ряд зарубіжних [2, 3] і вітчизняних фахівців [4] продовжують ці дослідження. Потоки реактивної потужності істотно впливають на режими електричних систем і мереж [5, 7], а також на показники якості електроенергії [8, 9]. Використання сучасних комп'ютерних технологій і програм розширюють наші уяв-

лення про природу реактивної потужності. Ці матеріали представлені в ряді зарубіжних публікацій [10, 11, 12]. Теоретичні дослідження нерозривно пов'язані з практичними питаннями компенсації реактивної потужності, що вимагає розробки сучасних ЗКРП. Доцільність встановлення конденсаторних батарей в промислових електричних мережах проаналізована в [13], а розробка принципів управління статичним компенсатором (СТАТКОМ) і дослідження його роботи на підстанціях змінного і постійного струму в [14, 15]. Ефективність і особливості компенсації реактивної потужності в умовах несинусоїдальних і нелінійних режимів представлені в [16, 17]. Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що проблема реактивної потужності і проблема розробки засобів по КРП має складний комплексний характер, що обумовлює необхідність подальших теоретичних і практичних досліджень в цій області. Метою статті є дослідження впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму і стійкість електроенергетичної системи.

Основна частина. У загальному випадку в електричній системі крім основних втрат, пов'язаних з передачею активної потужності, існують додаткові втрати, зумовлені реактивністю елементів системи, несиметрією навантажень, нестационарністю процесів і нелінійністю [18].

Одним з найбільш дієвих і ефективних способів зменшення як основних так і додаткових втрат є застосування ЗКРП на базі багаторівневих статичних конденсаторів. Використання конденсаторних установок дозволяє:

- розвантажити живлячі лінії електропередачі, трансформатори і розподільні пристрої;
- знизити витрати на оплату електроенергії;
- при використанні певного типу установок знизити рівень вищих гармонік;
- знизити несиметрію фаз.

Проведемо розрахунок і аналіз параметрів усталеного режиму електричної мережі за схемою глибокого введення методом Ньютона для металургійного комбінату Донецького регіону. При розрахунках використовувалися рівняння вузлових напруг в формі балансу потужності [19]. У матричній формі вони мають вигляд:

$$U_{diag} (Y_y U + Y_b U_b) = S, \quad (1)$$

де U_{diag} – діагональна матриця, k – діагональний еле-

мент котрої дорівнює спряженому комплексу напруги U_k вузла; S^* – вектор-стовпець, k елемент котрого дорівнює спряженому комплексу потужності k вузла.

Схема заміщення розподільчої електричної мережі за схемою глибокого введення представлена на рис. 1.

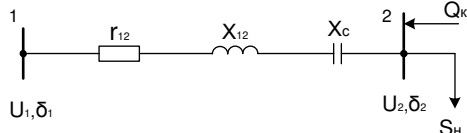


Рис. 1. Схема заміщення мережі

Дослідимо вплив на параметри режиму електричної мережі добової нерівномірності електричного навантаження, а також величин поздовжньої компенсації потужності ЛЕП (X_C) та величини компенсації реактивної потужності у споживача (Q_C)

Відомо, що електричне навантаження систем електропостачання нерівномірне. Фахівці виділяють добову, тижневу і річну нерівномірності. Зміна навантаження впливає на параметри режиму електричної мережі. Приймемо, що навантаження у споживача S_H протягом доби змінюється від максимального до мінімального значення в такий спосіб:

$$S_1 = (-60 - j20)MVA, S_2 = (-70 - j30)MVA,$$

$$S_3 = (-80 - j40)MVA, S_4 = (-90 - j50)MVA,$$

$$S_5 = (-100 - j60)MVA,$$

Характер цього впливу показаний на рис. 2. Аналіз наведених результатів показує, що зі збільшенням навантаження втрати активної і реактивної потужності в мережі збільшуються, крім того збільшуються втрата напруги і кут δ_2 , а напруга у споживача знижується.

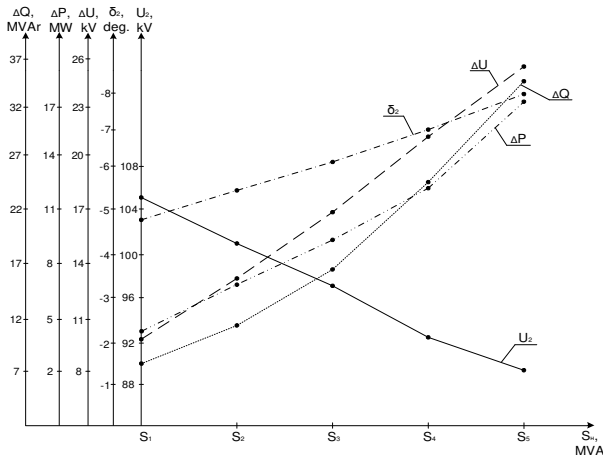


Рис. 2. Вплив добової нерівномірності навантаження на параметри режиму

На думку фахівців, на сьогодні одним з найбільш ефективних способів поліпшення режиму електричної мережі є компенсація потоків реактивної потужності у споживача. При цьому знижуються втрати потужності в мережі, а пропускна спроможність ліній підвищується. Результати розрахунків впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму наведені на рис. 3. Вони показують, що при компенсації падіння напруги,

втрати активної і реактивної потужності знижуються, а напруга і кут у споживача підвищуються.

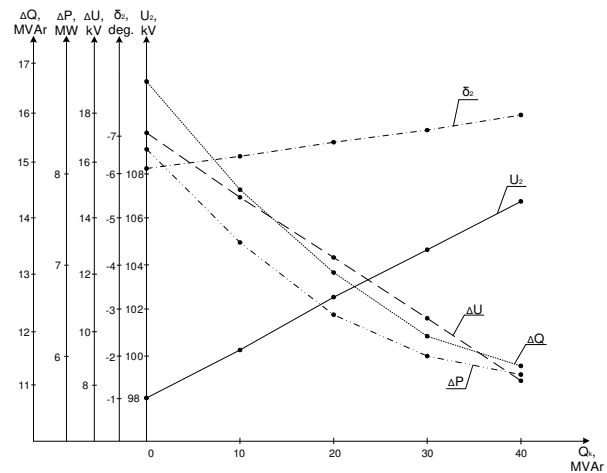


Рис. 3. Вплив компенсації реактивної потужності у споживача на параметри режиму

В останні роки підвищився інтерес до питань поздовжньої компенсації параметрів ЛЕП [20]. За своїм впливом збільшення величини поздовжньої компенсації аналогічно процесу збільшення компенсації реактивної потужності у споживача. Відмінність полягає у впливі на кут δ_2 . Функціональні залежності параметрів режимів від величини поздовжньої компенсації наведені на рис. 4.

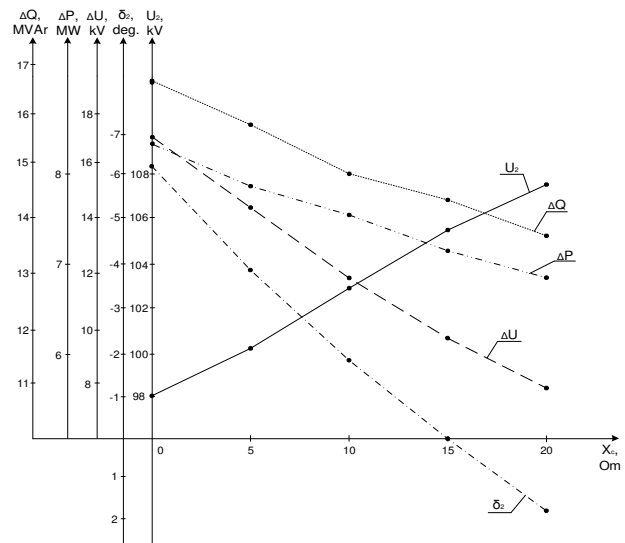


Рис. 4. Вплив поздовжньої компенсації ЛЕП на параметри режиму

Практична реалізація наших досліджень зводиться до визначення місць розміщення, типу і потужності СКРМ. Ці завдання вирішуються на основі подібних техніко-економічних розрахунків. В даний час для нормалізації рівнів напруги та зниження втрат потужності в розподільних мережах на вузлових підстанціях 110 кВ і вище, як правило, застосовуються шунтові конденсаторні батареї з встановленою потужністю 52 і 108 мВАр, а при проектуванні нових об'єктів в мережах 110 кВ рекомендується застосовувати шунтові конденсаторні батареї модульного типу з блоків заводського виготовлення з конденсаторами з екологічно безпечними матеріалами [21].

Таким чином, постачальнику електричної енергії економічно доцільна повна або близька до неї компенсація реактивної потужності. Однак з точки зору технічної доцільності у споживача і виробника електричної енергії виникають питання, пов'язані зі зниження стійкості вузлів навантаження і генеруючих станцій і можливістю порушення їх стійкості в результаті компенсації реактивної потужності батареями статичних конденсаторів.

Відомо [22], що компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може іноді приводити до істотного зниження запасів стійкості асинхронних двигунів і при високому ступені компенсації – до «лавини напруги». Наприклад, з розрахунків наведених в [22] виходить, що збільшення $\cos \phi$ від 0,89 до 0,95 знижує запас стійкості навантаження приблизно в 1,5 рази, а збільшення $\cos \phi$ до 1 практично призводить до нестійкості вузла навантаження.

У відповідності з керівними вказівками по стійкості енергосистем [23], коефіцієнт запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному режимі повинен бути не менше 15 %, в післяаварійному – не менше 10 %. Таким чином, виходячи з стійкості вузла навантаження, компенсувати реактивну потужності можна до рівня, при якому значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному і після аварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

Про вплив компенсації реактивної потужності на стійкість синхронних генераторів можна судити, розглянувши найпростішу електричну систему, в якій генератор видає потужність через трансформатор і лінію на шини навантаження. Схема заміщення такої системи представлена на рис. 5.

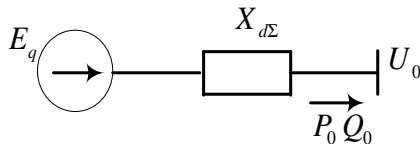


Рис. 5. Схема заміщення електричної системи

На схемі заміщення: U_0 – напруга на шинах навантаження; P_0 і Q_0 – активна і реактивна потужності, що видаються генератором в навантаження; $X_{d\Sigma}$ – результуючий індуктивний опір електропередачі.

Спрощена векторна діаграма синхронного неявнополюсного генератора при різному ступеню компенсації реактивної потужності навантаження наведе на рис. 6.

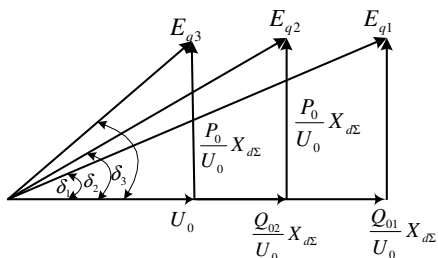


Рис. 6. Спрощена векторна діаграма синхронного генератора при різному ступеню компенсації реактивної потужності навантаження

На цій векторній діаграмі:

Q_{01} – реактивна потужність, що видається генератором в навантаження при відсутності компенсації реактивної потужності;

Q_{02} – реактивна потужність, що видається генератором в навантаження при 50 % компенсації реактивної потужності.

У третьому випадку реактивна потужність навантаження скомпенсована повністю, тобто $Q_{03} = 0$.

E_{q1} , E_{q2} и E_{q3} – ЕРС генератора, що забезпечують видачу однакової активної потужності, при відповідних реактивних потужностях, які видаються генератором в навантаження. Як видно з векторної діаграми значення ЕРС генератора істотно зменшується зі збільшенням компенсації реактивної потужності навантаження. Зменшення ЕРС генератора обумовлено тим, що при компенсації реактивної потужності навантаження зменшується струм в обмотках статора генератора. Це призводить до збільшення напруги на шинах генератора. В результаті чого вступає в дію автоматичний регулятор напруги, зменшуючи струм в обмотці збудження, що в кінцевому підсумку призводить до зниження ЕРС генератора.

Якщо знехтувати активними опорами елементів електропередачі, то межа переданої активної потужності неявнополюсного синхронного генератора може бути розрахована за формулою:

$$P_{np} = \frac{E_q U_0}{X_{d\Sigma}}, \quad (2)$$

З цієї формули випливає, що межа переданої активної потужності зменшується пропорційно зменшенню ЕРС генератора і, отже, зменшується коефіцієнт запасу статичної стійкості, що розраховується за формулою:

$$K_{s.stab.} = \frac{P_{np} - P_0}{P_0} 100\%, \quad (3)$$

У відповідності з керівними вказівками по стійкості енергосистем [23] коефіцієнт запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному режимі повинен бути не менше 20 % в післяаварійному – не менше 8 %. Таким чином, компенсувати реактивну потужності можна до рівня, при якому значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і післяаварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

У мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може призвести до порушення статичної стійкості типу самозбудження. Це пояснюється тим, що при підключенні досить великої ємності утворюється коливальний контур R-L-C, де L відповідає індуктивності генератора, трансформатора і лінії. При постійних значеннях R, L, C електричні коливання з часом згасають. В даному випадку індуктивність генератора періодично змінюється. У явнополюсного генератора вона змінюється від L_q до L_d через несиметрію ротора в подовжній і поперечній осях. Це при деяких умовах забезпечує можливість перетворення кінетичної енергії обертання ротора в електромагнітну енергію коливального контуру. Якщо втрати в цьому контурі досить малі, то амплітуда

коливань може наростати і таким чином виникає параметричний резонанс.

У неявнополюсного генератора його індуктивність при коливаннях ротора змінюється від L_d^I до L_q . При наявності ковзання між електромагнітним полем статора і обмотками ротора виникає асинхронний момент за рахунок взаємодії струмів, наведених в роторних обмотках і обертового поля статора. Під дією цього асинхронного електромагнітного моменту розвивається самозбудження. Це не параметричний резонанс, заснований на періодичній зміні індуктивності контуру. Для його існування необхідно лише включення відповідної ємності і наявність ковзання [24].

Відомі [25] два основних види самозбудження: асинхронне і синхронне. Асинхронне самозбудження можливо у всіх видах машин при власній частоті коливань контуру менше частоти генератора ω_0 . Самозбудження на частоті $\omega_{own} = \omega_0$ (синхронне самозбудження) можливо тільки у явнополюсних генераторів. Розвиток обох видів самозбудження припиняється, коли настає високий ступінь насичення генератора, тобто при режимі свідомо неприпустимому.

Наближена оцінка можливості самозбудження генераторів виконується побудовою областей самозбудження в координатах R, X_C (рис. 7), де R – сумарний активний опір найпростішої електричної системи; X_C – смісний результуючий опір батареї статичних конденсаторів і ємності послідовної компенсації.

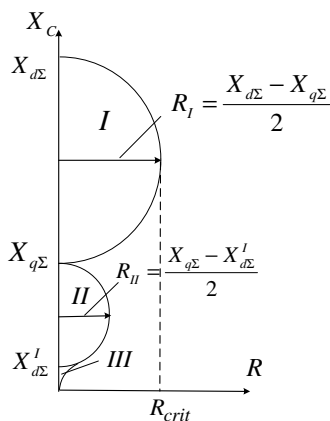


Рис. 7. Области самозбудження в координатах R, X_C :
I – зона синхронного самозбудження; II, III – зона асинхронного самозбудження

З рис. 7 видно, що при сумарному активному опорі найпростішої електричної системи менше критичного (R_{crit}) і результуючим опором ємності (X_C) менше $X_{d\Sigma}$ можливе порушення статичної стійкості типу самозбудження.

Висновки. Таким чином в статті показана техніко-економічна ефективність використання компенсації реактивної потужності. Встановлено її вплив на основні параметри режимів електричної мережі з урахуванням добової нерівномірності навантаження. У той же час, з точки зору технічної доцільності і для споживачів, і для виробників електричної енергії підходить до компенсації реактивної потужності батареями статичних конденсаторів потрібно дуже уважно.

По-перше, компенсувати реактивну потужність навантаження можна до рівня, при якому значення коефіцієнт запасу статичної стійкості по напрузі в

нормальному і післяаварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

По-друге, компенсувати реактивну потужність навантаження можна до рівня, при якому значення коефіцієнт запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і після аварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення і коефіцієнт потужності генераторів повинен бути близький до номінального.

По-третє, в мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів, не повинна призводити до виникнення самозбудження.

Список літератури

1. S. Frize, "Active and Apparent power in non-sinusoidal systems" // Przegląd Elektrot (In Poland). – 1931. – no.7. – pp. 193-203.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – vol. IA-20. – no. 3. – pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
3. H. Akagi, H. Kim // IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – 1999. – PEDS'99.
4. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №6. – С. 63-65.
5. Бурман А.П., Розанок Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
6. Хоменко І.В., Федосєєнко О.М., Стасюк І.В. Підвищення надійності пристроїв рпн силових трансформаторів. – 2017. – №170. – С. 60-71. doi: 10.18664/1994-7852.170.2017.111280.
7. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 122 с.
8. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электрической энергии в электрических сетях. – Киев: Наук. Думка, 1985. – 286 с.
9. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – Москва: Слектроатомиздат, 1985. – 224 с.
10. Bhattacharyya B., Goswami S.K., Bansal R.C. Hybrid Fuzzy Particle Swarm Optimization Approach for Reactive Power Optimization // J. Electrical Systems. – 2003. – №5.
11. Ouyang S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization // Energy and Power Engineering. – 2010. – no.2. – pp.306-312. doi: 10.4236/epe.2010.24043.
12. Durairaj S., Kannan P.S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization // Annual IEEE India Conference. – 2005. doi: 10.1109/indcon.2005.1590223.
13. Гудко Є.І. Про доцільність установаження конденсаторних батарей у промислових електричних мережах у сучасних економічних умовах // Энергетика и электрификация. – 1997. – № 2 – С. 30-31.
14. Пешков М.В. Разработка и исследование управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем. Дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 158 с.
15. Николаев А.Б. Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока. – НИИПТ. – Санкт-Петербург, 2005.
16. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Об определении реактивной мощности при несинусоидальных режимах // Проблемы энергетики. – 2005. – №1.
17. Саснко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями. Львів: НУ

- “Львівська політехніка”, 2003. – 36 с.
18. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – Москва: НУ ЭНАС, 2002. – 280 с.
 19. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические системы. Электрические сети. – Москва: высш. шк., 1998. – 511 с.
 20. Рыжов Ю.П., Некукар А.Р. О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов на выводах конденсаторных батарей // *Электричество*. – 2012. – № 1.
 21. Конышев В.С. Нанотехнологии и новая эра электролитических конденсаторов // *Нанотехнологии Экология Производство*. – 2009. – №1. – С. 84-84.
 22. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – Москва: Высш. шк., 1985. – 536 с.
 23. СОУ-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки. НТЦЕ НЕК Укренерго. Введ. в дію 21.10.2012. – 36 с.
 24. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – Москва: Энергия, 1979. – 456 с.
 25. Гуревич Б.Е., Либова Л.Е. Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
- References (transliterated)**
1. S. Frize, “Active and Apparent power in non-sinusoidal systems”. *Przeglad Electrot (In Poland)*, 1931, no.7, pp. 193-203.
 2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabaе A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol.IA-20, no.3, pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
 3. H. Akagi, H. Kim. *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 1999, PEDS’99.
 4. Zhemerev G.G., Il’ina O.V. Fryze power theory and modern power theories. *Electrical engineering & Electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65.
 5. Burman A.P., Rozanok Iu.K., Shakarian Iu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effek-tivnosti elektroenergeticheskikh system [Control of electric power flows and increase of efficiency power systems]. Moscow, MEI Publ., 2012. 336 p. (Rus).
 6. Khomenko I.V., Fedoseenko O.M., Stasiuk I.V. Improving the reliability of power transformers oltc devices. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2017, no.170, pp. 60-71. doi: 10.18664/1994-7852.170.2017.111280.
 7. Lezhniuk P.D., Kulik V.V., Burikin O.B. Vzaemovpliv elektrichnikh merezh i sistem v protsesi optimal'nogo keruvannia ikh rezhimami [In the process of optimal control of the electrical networks and systems]. Vinnitsia, Universum-Vinnitsia Publ., 2008. 122 p. (Ukr).
 8. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v elektricheskikh setiakh [Improving the quality of electrical energy in electrical networks]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. 286 p. (Rus).
 9. Zhelezko Iu.S. Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Compensation of reactive power and improvement of power quality]. Moscow, Elektroato-mizdat Publ., 1985. 224 p. (Rus).
 10. Bhattacharyya B., Goswami S.K., Bansal R.C. Hybrid Fuzzy Particle Swarm Optimization Approach for Reactive Power Optimization. *J. Electrical Systems*, 2003, no.5.
 11. Ouyang S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization. *Energy and Power Engineering*, 2010, no.2, pp.306-312. doi: 10.4236/epe.2010.24043.
 12. Durairaj S., Kannan P.S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization. *Annual IEEE India Conference*, 2005. doi: 10.1109/indcon.2005.1590223.
 13. Gudko С.I. Pro dotsil'nist' ustanovlennia kondensatornikh batarei u promislovikh elektrichnikh merezhakh u suchasnikh ekonomichnikh umovakh [On expediency of installation of capacitor batteries in industrial electric networks in modern economic conditions]. *Energetika i elektrifikatsiia – Energy and electrification*, 1997, no.2, pp. 30-31. (Ukr).
 14. Peshkov M.V. Razrabotka i issledovanie upravleniia staticheskim kompensatorom reaktivnoi moshchnosti tipa STATKOM dlia elektroenergeticheskikh system [Development and research of control of static compensator of reactive power type statcom for electric power systems]. Moscow, 2009. 158 p. (Ukr).
 15. Nikolaev A.B. Razrabotka printsipov upravleniia staticheskim kompensatorom (STATKOM) i issledovanie ego raboty na podstantsiiah peremennogo i postoiannogo toka [Development of principles of control of the static compensator (statcom) and investigation of its work on substations of alternating and direct current]. Saint-Petersburg, 2005. (Rus).
 16. Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. Ob opredelenii reaktivnoi moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh [About determination of reactive power at nonsinusoidal regimes]. *Problemy energetiki – Problems of energy*, 2005, no.1. (Rus).
 17. Saenko Iu.L. Reaktivna potuzhnist' v sistemakh elektropostachannia z nelineinimi navantazhenniami [Reactive power in power supply systems with nonlinear loads]. Lviv, NU “L'viv'ska politehnika” Publ., 2003. 36 p. (Ukr).
 18. Zhelezko Iu.S. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setiakh [Calculation, analysis and rationing of electricity losses in electrical networks]. Moscow, NU ENAS Publ., 2002. 280 p. (Rus).
 19. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti [Electrical systems. Electrical networks]. Moscow, Vyssha shkola. Publ., 1998. 511 p. (Rus).
 20. Ryzhov Iu.P., Nekukar A.R. O vozmozhnosti sooruzheniia na liniakh SVN ustroistv prodol'noi emkostnoi kompensatsii bez shuntiruiushchikh reaktorov na vyvodakh kondensatornykh batarei [On the possibility of constructing longitudinal capacitive compensation devices on SHV lines without shunt reactors on the terminals of capacitor banks]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2012, no.1. (Rus).
 21. Konyshhev V.S. Nanotekhnologii i novaia era elektroliticheskikh kondensatorov [Nanotechnology and the New Era of Electrolytic Capacitors]. *Nanotekhnologii Ekologiia Proizvodstvo – Nanotechnologies. Ecology. Production.*, 2009, no.1, pp. 84-84. (Rus).
 22. Venikov V.A. Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh [Transitional electromechanical processes in electronic electrical systems]. Moscow, Vyssha shkola Publ., 1985. 536 p. (Rus).
 23. SOU-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 Stiikist' energosistemi. Kerivni vkazivki [Sustainability Power system. Guidance]. NTTSE NEK Ukrenergo Publ, 2012. 36 p. (Ukr).
 24. Zhdanov P.S. Voprosy ustoiichivosti elektricheskikh system [Issues of stability of electrical systems]. Moscow, Energiia Publ., 1979. 456 p. (Rus).
 25. Gurevich B.E., Libova L.E. Okin A.A. Raschety ustoiichivosti i protivovariinnoi avtomatiki [Calculations of stability and emergency automation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p. (Rus).

Поступила (received) 17.08.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Хоменко Ігор Васильович (Хоменко Игорь Васильевич, Khomenko Igor Vasilyevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Піскурьов Михайло Федорович (Пискурев Михаил Федорович, Piskurev Mikhail Fedorovich) – доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, Україна.

Стасюк Іван Володимирович (Стасюк Иван Владимирович, Stasiuk Ivan Vladimirovich) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: brokeyourbike@gmail.com.