

УДК 631.365

## СТАБІЛІЗУВАЛЬНІ ТА КОМПЕНСУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ УСТАНОВКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РЕЖИМУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Ю. Жовнір

*Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. С. Бандери, 28 а, Львів 79013, Україна*

Розроблено метод і проаналізовано компенсувальні та стабілізуювальні властивості установки стабілізації режиму динамічного навантаження на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів.

*Ключові слова:* стабілізація режиму, динамічне навантаження, стабілізуювальні та компенсувальні властивості, розмах зміни реактивної потужності.

Застосування установки стабілізації режиму (УСР) на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів (ІСП) джерела напруги в джерело струму в електропостачальних системах з динамічним навантаженням (дугові сталеплавильні печі (ДСП) змінного струму, тягове навантаження, установки дугового зварювання тощо) є одним з перспективних заходів комплексного вирішення проблем енергоощадності та електромагнітної сумісності [1, 2, 5, 8].

Один з важливих аспектів проблеми розроблення УСР – вибір оптимального, з погляду мінімуму дисконтних витрат, варіанта схеми ІСП і співвідношення параметрів його елементів з урахуванням рівня показників електромагнітної сумісності навантаження та електропостачальної системи (ЕПС). Як засвідчив огляд літературних джерел, під час вибору варіанта схеми ІСП не враховували компенсувальних та стабілізуювальних властивостей перетворювача щодо координат режиму ЕПС. Для врахування міри впливу УСР з динамічним навантаженням на рівень електромагнітних завад необхідні функційні зв'язки між координатами режиму ЕПС та параметрами елементів установки. З огляду на це виникає потреба розроблення методу аналізу стабілізуювальних та компенсувальних властивостей УСР і визначення на його підставі залежностей між рівнями споживання реактивної потужності, розмахами її зміни та параметрами елементів установки.

Головні засади досліджень такі. Оскільки за частоти 2–10 Гц зміни резистансу навантаження максимальні, значення вільних складових координат режиму, які виникають унаслідок зміни енергетичного стану електричного кола УСР, є значно меншими від амплітудних значень періодичних складових, а також час їхнього загасання до нуля в три й більше разів менший від періоду зміни резистансу. Тому із задовільною точністю можна припустити, що координати режиму кола є синусоїдними функціями часу.

За основу порівняльного аналізу компенсувальних властивостей УСР динамічного навантаження, значення якого змінюється в часі за періодичним

законом, візьмемо поняття “обмінної енергії”, значення якої за період зміни навантаження можна обчислити за формулою

$$W_{\text{обм}} = \sum_{i=1}^n \left| \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q_i(t) dt \right|, \quad (1)$$

де  $Q_i(t)$  – функція зміни в часі реактивної потужності мережі на  $i$ -му інтервалі часу;  $t_{i-1}$ ,  $t_i$  – моменти часу, за яких значення функції  $Q_i(t)$  дорівнює нулю;  $n$  – кількість переходів функції  $Q_i(t)$  через нульове значення протягом періоду зміни навантаження. Очевидно, що найліпші компенсувальні властивості матиме схема УСР, для якої  $W_{\text{обм}} = 0$ .

Відомо, що розмах зміни напруги в мережах з динамічним навантаженням визначений розмахом зміни реактивної потужності навантаження та потужністю короткого замикання мережі в точці його приєднання [3, 4, 7]

$$\delta U_t = \frac{\delta Q}{S_{\text{кз}}}, \quad (2)$$

де  $\delta Q$  – розмах зміни реактивної потужності навантаження;  $S_{\text{кз}}$  – потужність короткого замикання мережі в точці приєднання навантаження.

Під час порівняльного аналізу стабілізуювальних властивостей схем УСР можна вважати  $S_{\text{кз}} = \text{const}$ , тому розмах зміни напруги визначений розмахом реактивної потужності

$$\delta Q = Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}, \quad (3)$$

де  $Q_{\text{max}}$ ,  $Q_{\text{min}}$  – відповідно, найбільше та найменше значення реактивної потужності, яке споживають мережі УСР із динамічним навантаженням за період його зміни.

Отримати найбільше та найменше значення реактивної потужності, яке споживають мережі УСР із динамічним навантаженням за період його зміни, можна на підставі функції зміни з часом реактивної потужності (рис. 1):

$$Q(t) = Q_{\text{УСР}}(t) + Q_{\text{Н}}(t), \quad (4)$$

де  $Q_{\text{УСР}}(t)$ ,  $Q_{\text{Н}}(t)$  – залежності зміни з часом реактивних потужностей, відповідно, УСР та навантаження.

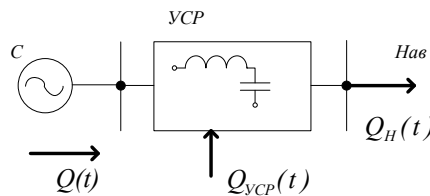


Рис. 1. Схема розподілу реактивних потужностей.

Складові (4) визначимо на підставі узагальненого однофазного еквівалента ІСП [1] (рис. 2), припустивши, що резистанс навантаження змінюється з часом за періодичним законом [2]

$$r_H(t) = r + \sigma_r \sin(2\pi f_r t), \quad (5)$$

де  $r$  – стала складова резистансу навантаження;  $\sigma_r$  – амплітуда змінної складової резистансу навантаження;  $f_r$  – частота зміни резистансу навантаження.

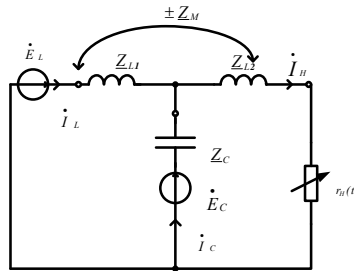


Рис. 2. Узагальнений однофазний еквівалент ІСП.

Тоді для заданого моменту часу вектор-стовпець повних та реактивних потужностей гілок кола (див. рис. 2)

$$\vec{S} = \text{diag}((\Delta \vec{E})^*) \underline{Y}_{\text{кп}} \vec{E}, \quad (6)$$

$$\vec{Q} = \text{Im}(\vec{S}), \quad (7)$$

де  $\Delta = (1 - \underline{Z} \underline{Y}_{\text{кп}})$  – матриця перетворень джерел ЕРС;  $\underline{Z} - (p \times p)$  – вимірна матриця імпедансів гілок;  $\underline{Y}_{\text{кп}}$  – матриця контурних перетворень провідностей гілок кола;  $\vec{E}$  – вектор-стовпець ЕРС гілок кола.

На підставі (5)–(7) отримаємо множини точок  $\{t_1, Q_{\text{УСР1}}; t_2, Q_{\text{УСР2}}; \dots; t_k, Q_{\text{УСРk}}\}$  та  $\{t_1, Q_{\text{н1}}; t_2, Q_{\text{н2}}; \dots; t_k, Q_{\text{нк}}\}$ , які відповідають залежностям  $Q_{\text{УСР}}(t)$  та  $Q_{\text{н}}(t)$ . Для визначення найбільшого та найменшого значення реактивної потужності навантаження апроксимуємо функції  $Q_{\text{УСР}}(t)$  та  $Q_{\text{н}}(t)$  гармонічними рядами, що проходять через задані множини точок:

$$Q_{\text{УСР}}(t) = Q_{\text{УСР0}} + \sum_{l=1}^m Q_l' \sin(2\pi f_l t) + \sum_{l=1}^m Q_l'' \cos(2\pi f_l t), \quad (8)$$

$$Q_{\text{н}}(t) = Q_{\text{н0}} + \sum_{g=1}^m Q_g' \sin(2\pi f_g t) + \sum_{g=1}^m Q_g'' \cos(2\pi f_g t), \quad (9)$$

де  $Q_{\text{УСР0}}$ ,  $Q_{\text{н0}}$  – сталі складові реактивної потужності, відповідно, УСР та навантаження;  $Q_l'$ ,  $Q_l''$ ,  $Q_g'$ ,  $Q_g''$  – амплітудні значення гармонічних складових

реактивних потужностей УСР та навантаження;  $m$  – порядковий номер останньої з врахованих гармонік.

Обмежимося першими чотирма членами розкладу методом підстановки, з матрично-векторних рівнянь отримаємо невідомі параметри апроксимації:

$$\begin{pmatrix} Q_{VCP0} \\ Q_1' \\ Q_1'' \\ \dots \\ Q_3' \\ Q_3'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(2\pi f_1 t_1) \cos(2\pi f_1 t_1) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_1) \cos(2\pi f_3 t_1) \\ 1 & \sin(2\pi f_1 t_2) \cos(2\pi f_1 t_2) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_2) \cos(2\pi f_3 t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin(2\pi f_1 t_k) \cos(2\pi f_1 t_k) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_k) \cos(2\pi f_3 t_k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Q_{yep1} \\ Q_{yep2} \\ \dots \\ Q_{yepk} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} Q_{H0} \\ Q_{H1}' \\ Q_{H1}'' \\ \dots \\ Q_{H3}' \\ Q_{H3}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(2\pi f_1 t_1) \cos(2\pi f_1 t_1) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_1) \cos(2\pi f_3 t_1) \\ 1 & \sin(2\pi f_1 t_2) \cos(2\pi f_1 t_2) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_2) \cos(2\pi f_3 t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin(2\pi f_1 t_k) \cos(2\pi f_1 t_k) & \dots & \sin(2\pi f_3 t_k) \cos(2\pi f_3 t_k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Q_{H1} \\ Q_{H2} \\ \dots \\ Q_{Hk} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

З урахуванням в (8)–(11) зміну з часом реактивної потужності, яку споживають з мережі, опишемо рівнянням

$$\begin{aligned} Q(t) = & Q_{H0} + Q_{VCP0} + (Q_1' + Q_{H1}') \sin(2\pi f_1 t) + (Q_1'' + Q_{H1}'') \cos(2\pi f_1 t) + \\ & + (Q_2' + Q_{H2}') \sin(2\pi f_2 t) + (Q_2'' + Q_{H2}'') \cos(2\pi f_2 t) + \\ & + (Q_3' + Q_{H3}') \sin(2\pi f_3 t) + (Q_3'' + Q_{H3}'') \cos(2\pi f_3 t). \end{aligned} \quad (12)$$

Максимальне та мінімальне значення реактивної потужності мережі на інтервалі часу  $[0; (1/f_r)]$  визначимо розв'язуванням задачі на умовний екстремум з використанням алгоритму методу Ньютона [6].

На підставі (1)–(12) у програмному середовищі Mathcad 11 проаналізовано компенсувальні та стабілізувальні властивості варіантів УСР на базі ІЄП з гальванічним та взаємодуктивним зв'язком елементів. Розрахунки виконано у відносних базових одиницях, де за базові прийнято значення ЕРС ( $E_L$ ) джерела живлення та власний індуктанс першої обмотки стабілізувального реактора ( $x_{L1}$ ). Резонансний контур ІЄП, утворений стабілізувальним реактором та конденсаторною батареєю (КБ), розладнували шляхом зміни ємнісного опору відносно резонансного значення на частоті джерела живлення.

Для кількісної оцінки ступеня розладнаності резонансного контуру використано кратність ємнісного опору конденсаторної батареї

$$x_C^* = \frac{x_C}{x_{L1}}, \quad (13)$$

де  $x_C$ ,  $x_{L1}$  – відповідно, ємнісний та власний індуктивний опір першої обмотки стабілізуювальних конденсаторної батареї та реактора. За умови резонансного налаштування ІСП на частоті джерела живлення  $x_C^* = 1$ .

Реактансне навантаження задане відносним індуктивним опором

$$x_H^* = \frac{x_H}{x_{L1}}, \quad (14)$$

де  $x_H$  – індуктивний опір навантаження.

Резистанси стабілізуювальних елементів ІСП задавали за добронестями гілок з реактором  $q_L=100$  та конденсаторною батареєю  $q_C=220$ .

Реалізації ІСП з гальванічним зв'язком елементів Г-подібної структури варіанти схем задавали зміною значення кута зсуву  $\delta$  початкових фаз ЕРС ( $\dot{E}_L, \dot{E}_C$ ), що діють у контурах із стабілізуювальними реактором та конденсаторною батареєю, та співвідношенням модулів цих ЕРС. Кут зсуву приймав значення 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 електричних градусів, а співвідношення модулів – 1,0 (симетричні схеми) та  $\sqrt{3}$  (несиметричні схеми). Крім того, для ІСП із взаємоіндуктивним зв'язком елементів Т-подібної структури варіанти схемних реалізацій задавали такими значеннями кута міжфазного магнітного зв'язку: 0, 60, 120, 240, 300 електричних градусів.

Під час дослідження нерезонансних ІСП розглянуто схеми з кратностями ємнісного опору КБ 1,1; 1,3; 2,0; 3,0; 5,0.

Як засвідчили дослідження, серед розглянутих варіантів найменші значення розмаху зміни реактивної потужності, яку споживають з мережі УСП з динамічним навантаженням, є у резонансній схемній реалізації Бушєро (рис. 3), а також у симетричних та несиметричних резонансних схемних реалізаціях ІСП з кутами  $\delta = 30, 60, 120$  електричних градусів з гальванічним зв'язком елементів за активного та активно-індуктивного навантаження.

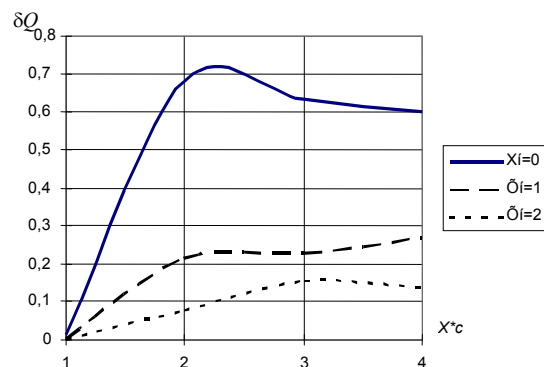


Рис. 3. Залежності розмаху зміни реактивної потужності мережі від кратності ємнісного опору конденсаторної батареї у схемі Бушєро.

Порівняно незначний розмах зміни реактивної потужності мережі простежено у резонансній схемі із взаємоіндуктивним зв'язком елементів ( $\delta=0$ ;  $\alpha=0$  електричних градусів). В інших варіантах схем з взаємоіндуктивним зв'язком (резонансних і нерезонансних) розмах зміни реактивної потужності суттєво перевищує відповідні значення резонансної схеми Бушєро з активним навантаженням (рис. 4).

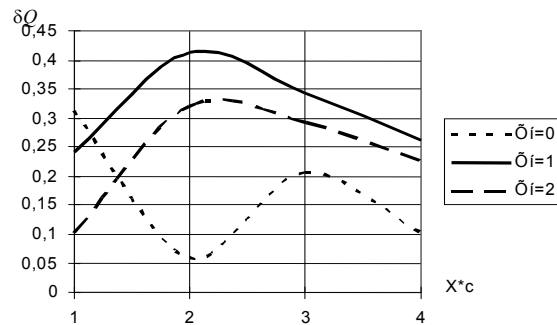


Рис. 4. Залежності розмаху зміни реактивної потужності мережі від кратності ємнісного опору конденсаторної батареї для схеми з взаємоіндуктивним зв'язком.

Збільшення кратності ємнісного опору конденсаторної батареї в схемі Бушєро за активного навантаження призводить до значного зростання розмаху зміни реактивної потужності мережі (див. рис. 3). За активно-індуктивного навантаження швидкість збільшення розмахів зміни реактивної потужності зі збільшенням кратності ємнісного опору конденсаторної батареї набагато менша.

Для навантаження з порівняно великим значенням індуктивного опору найліпші компенсувальні властивості має нерезонансна схема Бушєро з кратністю ємнісного опору 2,0 та 3,0 (рис. 5).

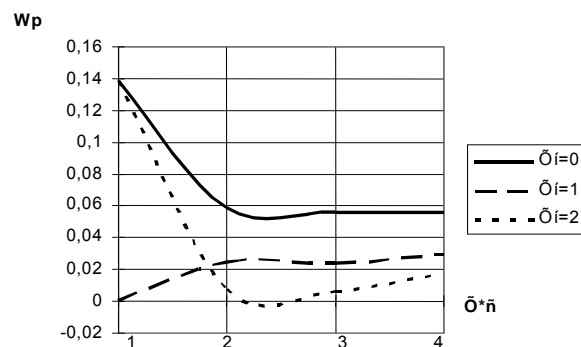


Рис. 5. Залежності обмінної енергії від кратності ємнісного опору конденсаторної батареї для схеми Бушєро.

Компенсувальні властивості схем із взаємоіндуктивним зв'язком елементів, наприклад, з  $\delta=0$  та  $\alpha=0$  електричних градусів, помітно виявляються за нерезонансного налаштування елементів та активного навантаження ( $x_c^*=1,8$ ), а також активно-індуктивного навантаження (рис. 6).

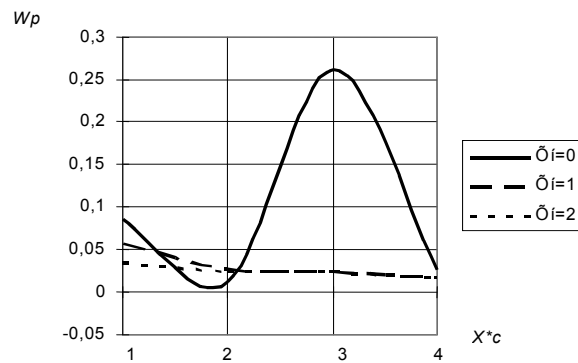


Рис. 6. Залежності обмінної енергії від кратності ємнісного опору конденсаторної батареї для схеми з взаємоіндуктивним зв'язком.

Отримані характеристики свідчать, що оптимальною, за необхідним рівнем компенсації реактивної потужності та за обмеженням коливань напруги джерела живлення при навантаженні на ДСП змінного струму, є нерезонансна схемна реалізація Бушєро.

Отже, розроблено метод аналізу стабілізувальних та компенсувальних властивостей установки стабілізації режиму динамічного навантаження на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів. На підставі розробленого методу отримано залежності, які відображають зв'язок характеристик електромагнітної сумісності та параметрів елементів установки стабілізації режиму динамічного навантаження. За отриманими характеристиками електромагнітної сумісності з'ясовано оптимальність нерезонансної схеми Бушєро.

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наук. думка, 1981. 176 с.
2. Генрих Г.А., Турковський В.Г. Влияние колебаний рабочего тока электротехнологических установок на их основные характеристики и питающую сеть // Электрические сети и системы. 1981. №5. С. 107–110.
3. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К.: Техніка, 1980. 160 с.
4. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
5. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наук. думка, 1974. 215 с.

6. *Сегеда М.С.* Математичне моделювання в електроенергетиці: Навч. посібник. Вид-во НУ "Львів. політехніка", 2002. 300 с.
7. *Овчаренко А.С., Розинский Д.И.* Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. К.: Техніка, 1989. 287 с.
8. *Турковский В.Г., Жовнір Ю.М.* Обоснование эффективности применения установки стабилизации режима в системе электроснабжения дуговых сталеплавильных печей переменного тока // Пром. энергетика. 2001. № 5. С. 40–44.

**STABILIZED AND COMPENSATED PROPERTIES INSTALLATION  
STABILIZATION OF MODE OF THE DYNAMIC LOAD**

**Y. Jovnir**

*Lviv Polytechnic National University, Chair of electric station  
Bandera Str., 28 a, Lviv 79013, Ukraine*

Method of the analysis stabilized and compensated installation stabilization of mode of the dynamic load on the basic inductive-capacitance transforms worked out.

*Key words:* installation stabilization of mode, dynamic load, stabilized and compensated properties, change energy, fluctuation reactive power.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005

Прийнята до друку 01.09.2005