

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ STATCOM ЗА ШВИДКИХ ЗМІН НАПРУГИ**Михайло Бурбело**

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
21021, burbelom@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4510-2911

Олексій Бабенко

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
21021, oleksij_babenko@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2773-6571

Денис Лебедь

аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
21021, 4e15b.lebyd@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7482-9741

У статті досліджено процеси керування STATCOM в умовах швидких змін напруги. Основна мета застосування STATCOM – компенсація реактивної потужності, що сприяє покращенню показників якості електроенергії, зокрема зменшенню коливань напруги. Розглянуто режими пасивної та активної компенсації реактивної потужності. Наведено математичні моделі, які описують залежність напруги у вузлі навантаження від параметрів компенсатора і джерела живлення. Показано, що в режимі пасивної компенсації реактивної потужності, який передбачає відсутність регулювання реактивної потужності за фіксованого значення напруги синхронного компенсатора, зміни напруги на навантаженні не перевищують 3,4 % за умови зміни напруги джерела живлення на 5 %. Однак це, як правило, не задовольняє споживачів. Режим активної компенсації забезпечує спрямоване регулювання реактивної потужності, що дозволяє досягти більшої стабільності напруги у вузлі мережі. Запропоновано залежність напруги компенсатора від напруги у вузлі навантаження, яку можна покласти в основу системи керування за збуренням STATCOM для зменшення швидких змін напруги джерела живлення. Результати моделювання показали, що у разі активної компенсації з застосуванням запропонованої залежності напруги компенсатора, напруга на навантаженні практично не змінюється при зміні напруги джерела живлення. Таким чином, впровадження запропонованої залежності в систему керування STATCOM істотно покращує стабільність напруги живлення споживачів. В реальних умовах експлуатації електричної мережі потужність синхронного компенсатора може виявитись недостатньою для забезпечення повної компенсації коливань напруги у вузлі приєднання споживача. У такому випадку запропоновано режим часткової компенсації коливань напруги з використанням одночасно режимів споживання та генерування реактивної потужності STATCOM. У разі підвищеної напруги джерела STATCOM споживає з мережі реактивну потужність, а у разі зниження напруги джерела живлення – генерує реактивну потужність, забезпечуючи стабільність напруги на навантаженні за обмеженої потужності STATCOM. Запропоновані моделі та підходи можуть бути використані для вдосконалення систем активної компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Ключові слова: статичний синхронний компенсатор (STATCOM), реактивна потужність, активне регулювання реактивної потужності, математичні моделі, стабілізація напруги.

Актуальність роботи. Погіршення якості електроенергії, зокрема нестабільність напруги та змінний характер споживання реактивної потужності, є ключовими проблемами сучасних електроенергетичних систем. Це зумовлено зростанням різкозмінних навантажень, використанням відновлюваних джерел енергії та підвищеними вимогами до стабільності

параметрів електромереж. Ефективне вирішення цих задач потребує впровадження сучасних методів компенсації, таких як використання статичних синхронних компенсаторів (STATCOM) [1-5].

STATCOM є одним з найбільш перспективних пристроїв, які забезпечують динамічну компенсацію реактивної потужності. Їх

впровадження дозволяє знизити втрати в мережі, стабілізувати напругу на навантаженні та покращити енергетичну ефективність електричних мереж. Проте, ефективність роботи STATCOM залежить від точності налаштування їх параметрів, режиму регулювання та врахування динаміки змін навантаження в електричній мережі [6–11].

У статті представлені експериментальні результати, що демонструють переваги впровадження активних методів компенсації реактивної потужності для зменшення коливань напруги.

Мета роботи – аналіз роботи STATCOM за умов швидких змін напруги в мережі, розробка математичних моделей його функціонування та дослідження впливу активної компенсації реактивної потужності на стабільність напруги.

Матеріал і результати досліджень. Основним призначенням STATCOM є компенсація реактивної потужності. Одночасно STATCOM може стабілізувати напругу, що зменшуватиме коливання напруги.

Проаналізуємо роботу STATCOM в режимі стабілізації напруги вузла електричної мережі, розрахункову схему та схему заміщення якого наведено відповідно на рис. 1 а та б.

Значення параметрів вузла мережі зі STATCOM: $X_0 = 1,158 \text{ Ом}$; $X_1 = 2,646 \text{ Ом}$; $X_2 = 0,015 \text{ Ом}$; $R_1 = 18,375 \text{ Ом}$; $X_3 = 27,563 \text{ Ом}$ (потужність навантаження $\underline{S}_3 = 6 + j4 \text{ МВ} \cdot \text{А}$).

Провідності віток

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{jX_0}; \underline{Y}_1 = \frac{1}{jX_1}; \underline{Y}_2 = \frac{1}{jX_2}; \underline{Y}_3 = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{jX_3}. \quad (1)$$

Напруги $\underline{U}_1$ та $\underline{U}_3$ розраховуються за формулою:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_0 + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 & -\underline{Y}_2 \\ -\underline{Y}_2 & \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_0 \cdot \underline{E}_0 + \underline{Y}_1 \cdot \underline{E}_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Напруга $\underline{E}_1$ STATCOM підбирається в процесі регулювання таким чином, щоб реактивна потужність забезпечувала оптимальний режим в електричній мережі, що характеризується стабільним значенням напруги на навантаженні, а активна потужність – дорівнювала нулю.

Розглянемо режим природної (пасивної) компенсації реактивної потужності, коли регулювання реактивної потужності відсутнє, наприклад, у разі, якщо $\underline{E}_1 = 10,3 - j0,62 \text{ кВ}$.

Для $E_0 = 10,5 \text{ кВ}$ струми, відповідно, джерела живлення, компенсатора та навантаження будуть:

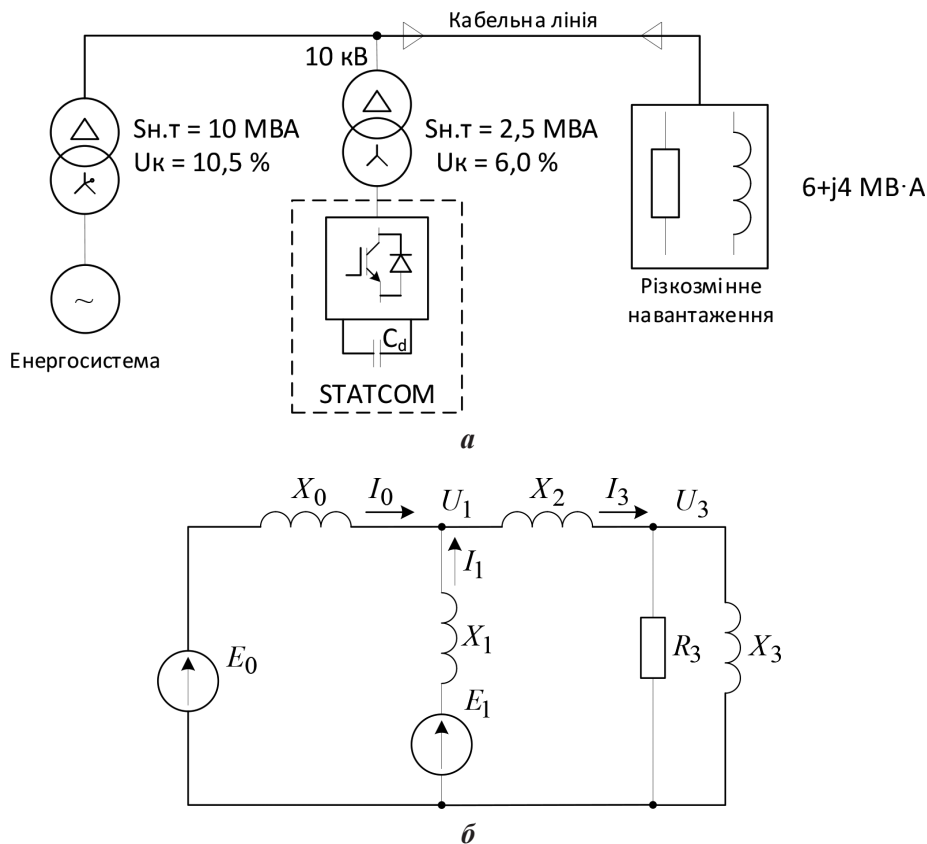


Рис. 1. Розрахункова схема (а) та схема заміщення (б) вузла навантаження електричної мережі із STATCOM

$$\underline{I}_0 = \underline{Y}_0 \cdot (\underline{E}_0 - \underline{U}_1) = 530 - j333 \text{ A};$$

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_1 \cdot (\underline{E}_1 - \underline{U}_1) = -2,4 - j67 \text{ A};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{Y}_3 \cdot \underline{U}_3 = 528 - j401 \text{ A}.$$

Потужності джерела живлення, компенсатора та навантаження, відповідно, дорівнюють:

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 5,56 + j3,5 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* = 0,017 + j0,7 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 5,58 + j3,72 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для $E_0 = 10$ кВ струми, відповідно, джерела живлення, компенсатора та навантаження:

$$\underline{I}_0 = \underline{Y}_0 \cdot (\underline{E}_0 - \underline{U}_1) = 517 - j196 \text{ A};$$

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_1 \cdot (\underline{E}_1 - \underline{U}_1) = -7,7 - j191 \text{ A};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{Y}_3 \cdot \underline{U}_3 = 510 - j387 \text{ A}.$$

Потужності джерела живлення, компенсатора та навантаження, відповідно, дорівнюють:

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 5,17 + j1,96 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* = 0,039 + j1,97 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 5,21 + j3,47 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Реактивна потужність навантаження і втрати реактивної потужності в лініях електропередачі компенсуються джерелом живлення і STATCOM. Зниження реактивної потужності джерела живлення, що зумовлене зниженням його напруги, компенсується STATCOM.

Для $E_0 = 10,5$ кВ значення напруг $\underline{U}_1 = 10,11 - j0,61$ кВ; $\underline{U}_3 = 10,11 - j0,62$ кВ. Для $E_0 = 10$ кВ

значення напруг $\underline{U}_1 = 9,77 - j0,6$ кВ; $\underline{U}_3 = 9,77 - j0,61$ кВ (рис. 2).

Зміни напруги на навантаженні в режимі природної компенсації реактивної потужності складають 0,34 кВ за змін напруги джерела живлення 0,5 кВ, що не завжди задовольняє споживачів.

Розглянемо режим активної компенсації реактивної потужності з активним регулюванням $\underline{E}_1$.

Реактивна потужність STATCOM має нелінійну залежність від E_1 :

$$Q = \frac{U_1 \cdot E_1}{X_1} \left(\frac{E_1}{U_1} - 1 \right) = \frac{E_1^2}{X_1} - \frac{U_1 \cdot E_1}{X_1}, \quad (3)$$

а напруга у вузлі мережі визначається за методом вузлових напруг:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{Y}_0 \cdot \underline{E}_0 + \underline{Y}_1 \cdot \underline{E}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_{23}}, \quad (4)$$

де $\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_2 \cdot \underline{Y}_3 / (\underline{Y}_2 + \underline{Y}_3)$.

Для стабілізації напруги у вузлі мережі необхідним є виконання умови:

$$\underline{Y}_0 \cdot \underline{E}'_0 + \underline{Y}_1 \cdot \underline{E}'_1 = \underline{Y}_0 \cdot \underline{E}''_0 + \underline{Y}_1 \cdot \underline{E}''_1, \quad (5)$$

де $\underline{E}'_0$, $\underline{E}''_0$; $\underline{E}'_1$, $\underline{E}''_1$ – значення $\underline{E}_0$ та $\underline{E}_1$ за двох різних режимів напруги електричної мережі.

Звідси отримаємо:

$$\underline{E}''_1 - \underline{E}'_1 = \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} (\underline{E}'_0 - \underline{E}''_0). \quad (6)$$

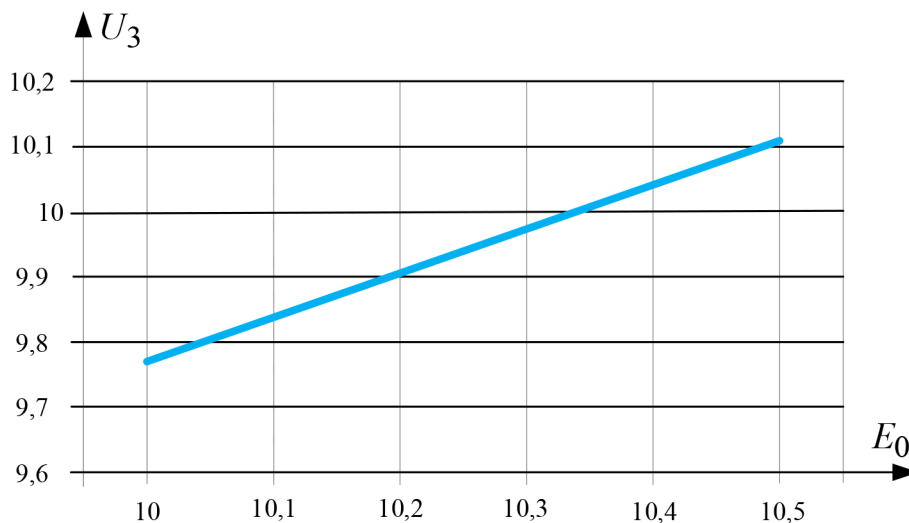


Рис. 2. Залежність напруги на навантаженні від напруги джерела живлення за наявності STATCOM з $\underline{E}_1 = 10,3 - j0,62$ кВ

Умова відсутності генерування реактивної потужності STATCOM формулюється у такому вигляді:

$$\underline{E}'_1 = \underline{U}'_1 = \frac{\underline{Y}_0 \cdot \underline{E}'_0}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_{23}}. \quad (7)$$

З останніх двох виразів випливає, що підтримання стабільної напруги на навантаженні досягається з використанням такої залежності керування STATCOM:

$$\underline{E}E''_1 = \underline{U}'_1 + \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} \cdot (\underline{E}'_0 - \underline{E}''_0). \quad (8)$$

Звідси можна отримати залежність, яка забезпечує стабілізацію напруги на навантаженні за швидких змін напруги живлення $E_0 = 10,0 \cdot k$ кВ, де $k = 1,0, \dots, 1,05$:

$$\underline{E}_1 = \underline{U}'_1 + \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} \cdot (1,05 - k). \quad (9)$$

При цьому необхідно також забезпечити нульове значення активної потужності компенсатора, наприклад, ввівши додатковий множник $[1 + j \operatorname{Im}(\underline{U}'_1)]$ в другий доданок (9):

$$\underline{E}_1 \approx \underline{U}'_1 + \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} [1 + j \operatorname{Im}(\underline{U}'_1)] \cdot (1,05 - k), \quad (10)$$

де $\underline{U}'_1$ визначається з (7): $\underline{U}'_1 = 10,04 - j0,61$ кВ.

Для наведеного прикладу у разі застосування (10) в системі керування STATCOM напруга на

навантаженні складає 10,03 в усьому діапазоні зміни напруги джерела живлення від 10 кВ до 10,5 кВ (рис. 3). Споживання активної потужності при цьому відсутнє.

Реактивна потужність компенсатора при цьому змінюється від нуля до 4,82 МВАр. Однак досить часто потужність STATCOM обмежена.

У разі недостатньої потужності STATCOM вибирається компроміс між неповною компенсацією коливань напруги і потужністю STATCOM:

$$\underline{E}_1 \approx \underline{U}'_1 + k_1 \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} [1 + j \operatorname{Im}(\underline{U}'_1)] \cdot (1,05 - k), \quad (11)$$

де k_1 – значення коефіцієнта СТАТКОМ, яке задається в процесі регулювання.

Якщо $k_1 = 0,4$, то напруга компенсатора дорівнює $\underline{E}_1 = 10,04 - j0,61$ кВ при $E_0 = 10,5$ кВ та $\underline{E}_1 = 10,5 - j0,58$ кВ при $E_0 = 10$ кВ, то значення напруг, відповідно, будуть:

$$\underline{U}_1 = 10,04 - j0,61 \text{ кВ}; \underline{U}_3 = 10,03 - j0,61 \text{ кВ}$$

при $E_0 = 10,5$ кВ

та $\underline{U}_1 = 9,84 - j0,59$ кВ; $\underline{U}_3 = 9,83 - j0,6$ кВ при $E_0 = 10$ кВ.

Швидкі зміни напруги на навантаженні складають 0,2 кВ за зміни напруги джерела живлення 0,5 кВ (рис. 4). Таке значення швидких змін напруги можна вважати прийнятним в окремих випадках.

У першому випадку ($E_0 = 10,5$ кВ) потужності джерела живлення, компенсатора та навантаження, відповідно, дорівнюють:

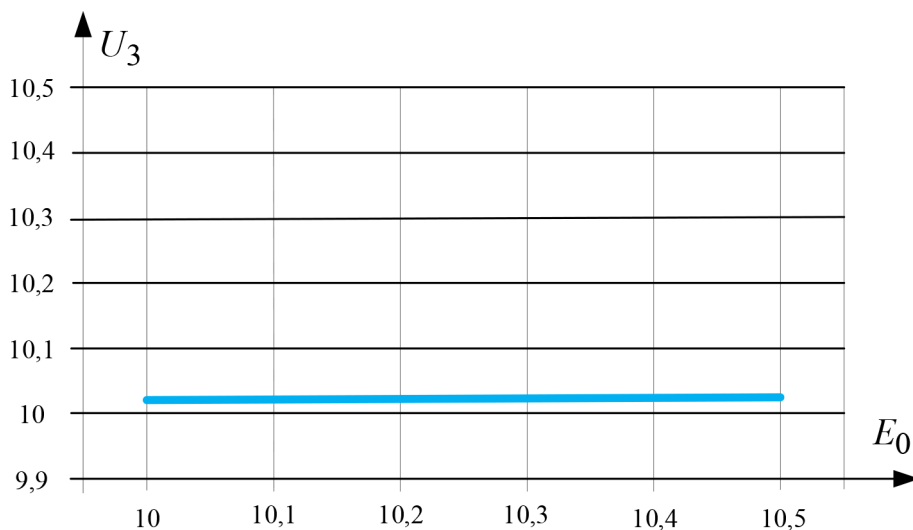


Рис. 3. Залежність напруги на навантаженні від напруги джерела живлення у вузлі навантаження з STATCOM

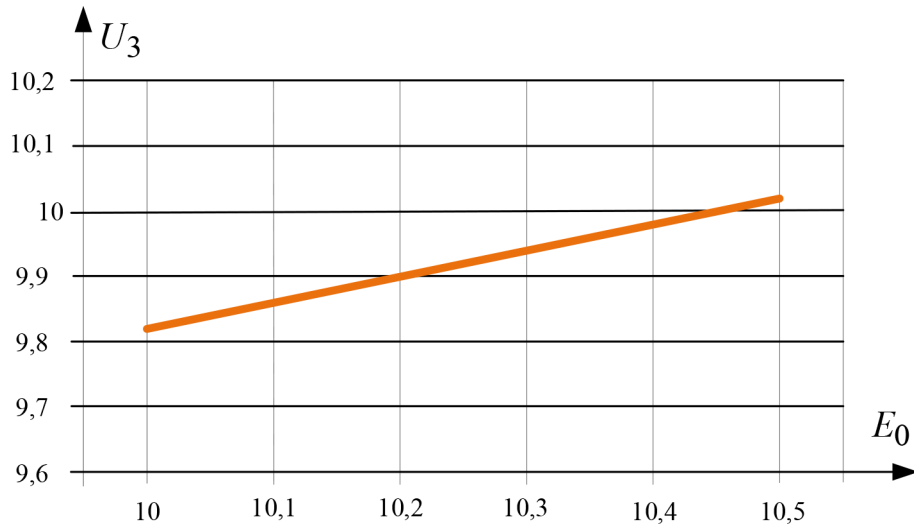


Рис. 4. Залежність напруги на навантаженні від напруги джерела живлення за наявності STATCOM з $k_1 = 0,4$

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 5,51 + j4,17 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* = -0,01 + j0,00 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 5,50 + j3,67 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

У другому випадку ($E_0 = 10$ кВ) потужності джерела живлення, компенсатора та навантаження, відповідно, дорівнюють:

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 5,26 + j1,29 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* = -0,04 + j2,76 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 5,29 + j3,53 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для зменшення потужності компенсатора його можна переводити в режим споживання реактивної потужності у разі більшої напруги

джерела живлення. Якщо $k_1 = 0,875$, то напруга компенсатора дорівнює $\underline{E}_1 = 9,54 - j0,58$ кВ при $E_0 = 10,5$ кВ та $\underline{E}_1 = 10,54 - j0,64$ кВ при $E_0 = 10$ кВ.

Значення напруг, відповідно будуть:

$\underline{U}_1 = 9,89 - j0,59$ кВ; $\underline{U}_3 = 9,88 - j0,6$ кВ при $E_0 = 10,5$ кВ

та $\underline{U}_1 = 9,83 - j0,61$ кВ; $\underline{U}_3 = 9,82 - j0,62$ кВ при $E_0 = 10$ кВ.

Швидкі зміни напруги на навантаженні складають 0,06 кВ за зміни напруги джерела живлення 0,5 кВ (рис. 5). Таке значення швидких змін напруги є прийнятним.

У першому випадку ($E_0 = 10,5$ кВ) потужності джерела живлення, компенсатора та навантаження, відповідно, дорівнюють:

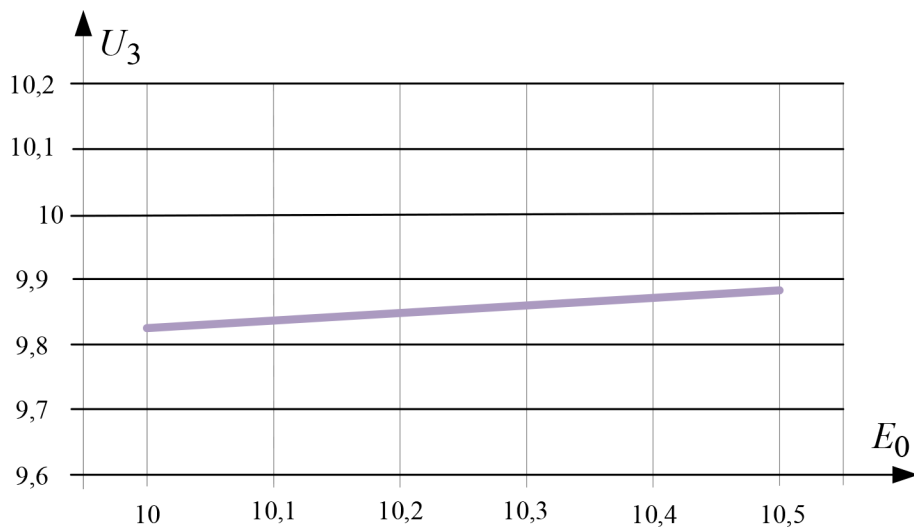


Рис. 5. Залежність напруги на навантаженні від напруги джерела живлення за наявності STATCOM з $k_1 = 0,875$

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{I}_0^* = 5,36 + j5,51 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* = -0,02 - j1,28 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 5,34 + j3,56 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

У другому випадку ($E_0 = 10$ кВ) значення струмів і потужностей такі ж як в попередньому випадку.

У цьому режимі STATCOM споживає з мережі додаткову реактивну потужність $-1,28$ МВАр при $E_0 = 10,5$ кВ. Реактивна потужність генерування становить $2,76$ МВАр при $E_0 = 10$ кВ.

Таким чином, формула (11) може бути покладена в основу системи керування STATCOM за обмеженої потужності компенсатора.

Висновки. У статті проаналізовано можливість компенсації коливань напруги за допомогою STATCOM за швидких змін напруги в електромережі. Показано, що у режимі пасивної компенсації реактивної потужності стабілізація напруги є обмеженою, що може не задовольняти вимоги споживачів. Режим активної компенсації з направленим регулюванням реактивної потужності значно підвищує якість електроенергії завдяки оптимізації роботи компенсатора. Запропоновані залежності регулювання напруги можуть бути покладені в основу побудови системи керування STATCOM за швидких змін вхідного параметру за достатньої та обмеженої потужності компенсатора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hanson D.J., Woodhouse M.L., Horwill C., Monkhouse D.R., Osborne M.M. Statcom: a new era of reactive compensation. *Power engineering journal*. June 2002. P. 151–160.
2. Jain A.K., Mohan N. Fast Load Voltage Regulation Using STATCOMs. *Caribbean colloquium on power quality (CCPQ)*. June 2003. P. 1–4.
3. Jain A.K., Joshi K., Behal A., Mohan N. Modeling and nonlinear control of STATCOMs for fast voltage regulation. In *Proc. Amer. Contr. Conf.* Portland, Jun. 2005. P. 1295–1300.
4. Jain A., Joshi K., Behal A., Mohan N. Voltage regulation with STATCOMs: modeling, control and results. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21, No. 2. P. 726–735. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.855489>
5. Shahnian F., Rajakaruna S., Ghosh A. (eds.). Static compensators (STATCOMs) in power Systems. *Springer Science+Business Media Singapore*. 2015. 721 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-287-281-4>
6. Abido M.A. Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement. *Electric Power Systems Research*. 2005. Vol. 73. P. 177–185.
7. Çetin A., Ermiş M. VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination, *IEEE Transactions On Industry Applications*. May/June 2009, Vol. 45, No. 3. P. 1000–1015.
8. Kanchanaharuthai A., Chankong V., Loparo K.A. Transient Stability and Voltage Regulation in Multimachine Power Systems Vis-à-Vis STATCOM and Battery Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Systems*. September 2015. Vol. 30. Issue 5. P. 2404–2416. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2359659>
9. Kerrouche K.D.E., Lodhi E., Kerrouche M.B., Wang L., Zhu F., Xiong G., Modeling and design of the improved D-STATCOM control for power distribution grid. *Springer Nature Switzerland AG*, 2020.
10. Burbelo M., Babenko O., Loboda Y., Lebed D., Kolesnytskyj O.K., Rakhmetullina S.J., Mussabekov M. Automatic adjustment of reactive power by facts devices under conditions of voltage instability in the electric network. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 109–113. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5377>
11. Бурбело М.Й., Слободян Р.О. Стратегія керування джерелами реактивної потужності в розподільних електричних мережах для оптимізації втрат електроенергії. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. № 1. С. 209–214. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.28>

ANALYSIS OF STATCOM CONTROL PROCESS UNDER RAPID VOLTAGE CHANGES

Mykhailo Burbelo

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Electrotechnical Systems of Power Consumption and Energy Management
Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytske Shosse str., Vinnitsia, Ukraine, 21021,
burbelom@ukr.net

ORCID: 0000-0002-4510-2911

Oleksii Babenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Electrotechnical Systems of Power Consumption and Energy Management

Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytske Shosse str., Vinnitsia, Ukraine, 21021, oleksij_babenko@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2773-6571

Denys Lebed

Graduate Student at the Department of Electrotechnical Systems of Power Consumption and Energy Management

Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytske Shosse str., Vinnitsia, Ukraine, 21021, 4e15b.lebyd@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7482-9741

The article investigates the processes of STATCOM control under conditions of rapid voltage changes. The main purpose of STATCOM application is reactive power compensation, which contributes to improving the quality of electricity, in particular, reducing voltage fluctuations. The modes of passive and active reactive power compensation are considered. Mathematical models are presented that describe the dependence of the voltage in the load node on the parameters of the compensator and the power source. It is shown that in the passive reactive power compensation mode, which assumes the absence of reactive power regulation at a fixed value of the synchronous compensator voltage, the voltage changes on the load do not exceed 3.4 % under the condition of a change in the power source voltage of up to 5 %. However, this does not always satisfy consumers. The active compensation mode provides directional control of reactive power, which allows achieving greater voltage stability in the network node.

The dependence of the compensator voltage on the voltage at the load node is proposed, which can be used as the basis for a STATCOM disturbance control system to reduce rapid changes in the power source voltage. The simulation results showed that in the case of active compensation using the proposed compensator voltage dependence, the load voltage practically does not change when the power source voltage changes. Thus, the implementation of the proposed dependence in STATCOM control systems significantly improves the stability of the consumer supply voltage. In real operating conditions of the electric network, the power of the synchronous compensator may be insufficient to ensure full compensation of voltage fluctuations at the consumer connection node. In this case, a partial compensation mode of voltage fluctuations using the STATCOM reactive power consumption and generation modes is proposed. In the case of an increased source voltage, the STATCOM consumes reactive power from the network, and in the case of a decrease in the power source voltage, it generates reactive power, ensuring the stability of the load voltage with limited STATCOM power. The proposed models and approaches can be used to improve active reactive power compensation systems in electric networks.

Key words: static synchronous compensator (STATCOM), reactive power, active reactive power control, mathematical models, voltage stabilization.

REFERENCES

1. Hanson, D.J., Woodhouse, M.L., Horwill, C., Monkhouse, D.R., & Osborne M.M. (2002). Statcom: a new era of reactive compensation. *Power engineering journal*, June, 151–160.
2. Jain, A.K., & Mohan, N. (2003). Fast Load Voltage Regulation Using STATCOMs. *Caribbean colloquium on power quality (CCPQ)*, June, 1–4.
3. Jain, A.K., Joshi, K., Behal, A., & Mohan N. (2005). Modeling and nonlinear control of STATCOMs for fast voltage regulation. In *Proc. Amer. Contr. Conf. Jun.* (pp. 1295–1300), Portland.
4. Jain, A., Joshi, K., Behal, A., & Mohan, N. (2006). Voltage regulation with STATCOMs: modeling, control and results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 2, 726–735. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.855489>
5. Shahnia, F., Rajakaruna, S., & Ghosh, A. (eds.). (2015). *Static compensators (STATCOMs) in power Systems*. Springer Science+Business Media Singapore. DOI <https://doi.org/10.1007/978-981-287-281-4>
6. Abido, M.A. (2005). Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement. *Electric Power Systems Research*, Vol. 73, 177–185.
7. Çetin, A., & Ermiş, M. (2009). VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 45, No. 3, 1000–1015.
8. Kanchanaharuthai, A., Chankong, V., & Loparo K.A. (2015). Transient Stability and Voltage Regulation in Multimachine Power Systems Vis-à-Vis STATCOM and Battery Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, Issue 5, 2404–2416. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2359659>
9. Kerrouche, K.D.E., Lodhi, E., Kerrouche, M.B., Wang, L., Zhu, F., & Xiong, G. (2020). *Modeling and design of the improved D-STATCOM control for power distribution grid*. Springer Nature Switzerland AG.
10. Burbelo, M., Babenko, O., Loboda, Y., Lebed, D., Kolesnytskyj, O. K., Rakhmetullina, S.J. et. al. (2023).

Automatic adjustment of reactive power by facts devices under conditions of voltage instability in the electric network. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, Vol. 13, No. 4, 109–113. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5377>

11. Burbelo, M.Y., & Slobodian R.O. (2024). Stratehiia keruvannia dzherelamy reaktyvnoi potuzhnosti v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh dlia optymizatsii

vtrat elektroenerhii [Strategy for controlling reactive power sources in distribution electrical networks to optimize electricity losses]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Scientific journal “Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University”*, 1, 209–214 [In Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.28>

Стаття надійшла 27.01.2025