УДК 621.316 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.067

МЕТОД ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ STATCOM ЗАДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ У ВУЗЛІ НАВАНТАЖЕННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

М.Й. Бурбело*, докт. техн. наук**, О.В. Бабенко****, канд. техн. наук
Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна.
E-mail: burbelom@ukr.net; oleksij_babenko@ukr.net.

Запропоновано метод прямого керування статичним синхронним компенсатором (STATCOM) задля зменшення коливань напруги внаслідок нестабільності навантаження та напруги живлення в розподільних електричних мережах. Проаналізовано роботу STATCOM, який працює в режимі стабілізації напруги вузла розподільної електричної мережі 10 кВ. Отримано значення ЕРС компенсатора, яка забезпечує стабільне значення напруги вузла навантаження за зміни провідності навантаження споживача. Вказана ЕРС визначається за значеннями приростів активної та реактивної складових струму навантаження, напругою вузла приєднання компенсатора за нульового значення реактивного струму STATCOM та параметрів електричної мережі. Проаналізовано процес стабілізації напруги в вузлі приєднання навантаження за умови змін напруги джерела живлення та відповідний закон керування компенсатором, що передбачає використання таких інформативних параметрів як поточне та базове значення напруги джерела живлення, параметри мережі, а також напруга вузла приєднання STATCOM. Отримано вирази задля визначення ЕРС STATCOM, яка забезпечує стабільну напругу вузла приєднання компенсатора і навантаження, а також нульове значення активної потужності в колі компенсатора за нестабільного навантаження, а також змін напруги джерела живлення. Показано, що задля ефективної роботи компенсатора необхідно здійснювати вимірювання струмів навантаження та напруги вузла навантаження. Виконано моделювання роботи STATCOM за умови зміни активного та реактивного навантаження споживача у діапазоні ±25% і коливання напруги джерела живлення в межах 2%, що найбільш часто спостерігається в електричних мережах. Показано, що за середньої потужності навантаження 4+j2 МВ·А і стабілізованої напруги 10,25 кВ потужність компенсатора знаходиться в межах від -0,57 МВАр до 2,4 МВАр. За необхідності підвищення рівня стабілізації напруги до 10,3 кВ потужність компенсатора зростає до 2,8 МВАр. Бібл. 16, рис. 7, табл. 1.
***Ключові слова**:* статичний синхронний компенсатор (STATCOM), пряме керування, реактивна потужність, стабілізація напруги.

Вступ. Якість напруги в електричній мережі впливає на надійність та економічність роботи споживачів електроенергії, серед яких є електропривод, освітлення, засоби електроніки, технологічні установки та інші. Наявні в електричних мережах різко змінні навантаження викликають коливання напруги, що призводить до нестабільності в роботі, зниження ефективності та продуктивності технологічного обладнання [1]. Тому актуальним є розробка заходів, які дають можливість підвищити якість напруги в електричних мережах споживачів і, відповідно, економічну ефективність підприємств.

Задля стабілізації напруги в вузлах розподільних електричних мереж, забезпечення балансу реактивної потужності застосовуються численні засоби, серед яких значного поширення набули розподільні статичні синхронні компенсатори STATCOM [2–3]. Основною перевагою STATCOM є швидка компенсація реактивної потужності, що дає змогу зменшувати коливання напруги. Задля ефективної роботи STATCOM необхідно забезпечити достатню їхню потужність, а також відповідний для конкретних умов алгоритм керування.

Задля стабілізації напруги за допомогою STATCOM можливі дві стратегії: 1) вимірювання напруги і за її відхиленням від заданого значення збільшення генерування реактивної потужності; 2) вимірювання навантаження і напруги та за їхніми відхиленнями від заданих значень збільшення реактивної потужності. Описані стратегії в теорії автоматичного керування класифікуються як керування за відхиленням та комбіноване керування, яке включає керування за відхиленням (напруга) та керування за збуренням (навантаження).

© Бурбело М.Й., Бабенко О.В., 2026
ORCID: * https://orcid.org/0000-0002-4510-2911; ** https://orcid.org/0000-0003-2773-6571
© Видавець ВД «Академперіодика», НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

Задля стабілізації напруги переважно використовують керування за відхиленням, для якого розроблено досконалі алгоритми, наприклад, [4–9]. Серед цих алгоритмів можна виділити керування з лінеаризацію за виходом [4], адаптивні алгоритми керування [5], робастні алгоритми керування [6–7], ковзні алгоритми керування [8–9] та інші. В [10–15] використано комбіноване керування STATCOM, яке передбачає вимірювання напруги у вузлі встановлення STATCOM та струму навантаження. Водночас, в цих роботах увагу зосереджено на розробці різних видів регуляторів в каналі зворотного зв'язку і недостатньо обґрунтовано алгоритм прямого керування STATCOM за збуренням.

Комбіноване керування дає змогу реалізувати більш інтелектуальні, «м'які» алгоритми керування. Наприклад, може бути прийняте рішення не намагатися відновити напругу до 100% (що може бути не можливо), а перейти в режим підтримки, видаючи меншу реактивну потужність [16]. Однак при цьому виникає задача високої швидкодії формування керувальних дій. Це можливо здійснити за використання прямого регулювання STATCOM.

Метою роботи є розробка методу та математичних моделей прямого регулювання STATCOM задля стабілізації напруги за умов зміни потужності навантаження та напруги джерела живлення, що призводять до коливань напруги.

1. Аналіз роботи STATCOM в режимі стабілізації напруги. Проаналізуємо роботу STATCOM в режимі стабілізації напруги вузла електричної мережі, схему заміщення якого наведено на рис. 1.

Комплексні провідності віток схеми заміщення

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{R_0 + jX_0};\ \ \underline{Y}_1 = \frac{1}{R_1 + jX_1};\ \ \underline{Y}_2 = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{jX_2}. \qquad (1)$$

Одним із найбільш важливих питань стабілізації напруги у вузлі електричної мережі є вибір значення напруги за нульового значення реактивного струму STATCOM. В [16] запропоновано вибирати ЕРС STATCOM з умови

$$\dot{E}_1^{(0)} = \dot{U}_1^{(0)} = \frac{\dot{E}_0^{(0)} \cdot \underline{Y}_0}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_2^{(0)}}, \qquad (2)$$

де $\dot{E}_0^{(0)}$ – базове значення ЕРС джерела живлення, наприклад, 10,5 кВ; $\underline{Y}_2^{(0)}$ – базове значення комплексної провідності навантаження, наприклад, середнє значення.

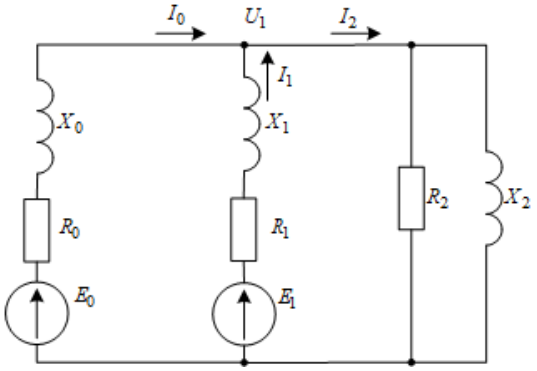


Рис. 1. Схема заміщення вузла навантаження електричної мережі із STATCOM

Задача стабілізації напруги у вузлі електричної мережі за допомогою STATCOM зводиться до виконання двох умов

$$\left|\dot{U}_1^{(1)}\right| = \left|\dot{U}_1^{(0)}\right| \ \text{або} \ \left|\frac{\dot{E}_0^{(1)} \cdot \underline{Y}_0 + \dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2^{(1)}}\right| = \left|\frac{\dot{E}_0^{(0)} \cdot \underline{Y}_0}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_2^{(0)}}\right|; \qquad (3)$$

$$P_1 = 0 \ \ \text{або} \ \ \mathrm{Re}\left[\left(\frac{\dot{E}_0^{(1)} \cdot \underline{Y}_0 + \dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2^{(1)}}\right) \cdot \left(\left(\dot{E}_1 - \frac{\dot{E}_0^{(1)} \cdot \underline{Y}_0 + \dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2^{(1)}}\right) \cdot \underline{Y}_1\right)^*\right] = 0. \qquad (4)$$

Причиною виникнення нестабільності напруги є зміна провідності навантаження або напруги джерела живлення. Розв'язавши систему рівнянь (3), (4), можна знайти значення ЕРС STATCOM, яке забезпечує стале значення напруги у вузлі електричної мережі за конкретних значень $\dot{E}_0^{(1)}$, $\underline{Y}_2^{(1)}$.

Однак нас цікавить побудова системи керування STATCOM максимальної швидкодії, вставки регулювання якої корегуються за мінімально можливий час і які залишаються сталими в певному діапазоні змін напруги живлення й навантаження.

2. Визначення ЕРС STATCOM задля стабілізації напруги за умов змін напруги джерела живлення і змінного навантаження споживача. Розглянемо спочатку можливість швидкого налаштування STATCOM для компенсації змін навантаження.

Прирости активної та реактивної складових спаду напруги на лінії електропередачі за нестабільності навантаження з урахуванням наявності STATCOM будуть [10]

$$\Delta U_{0\text{a}} + j\Delta U_{0\text{p}} = \left(R_0\Delta I_{2\text{a}} - X_0\Delta I_{2\text{p}} + R_0\Delta I_{1\text{a}} - X_0\Delta I_{1\text{p}}\right) + \\ + j\left(X_0\Delta I_{2\text{a}} + R_0\Delta I_{2\text{p}} + X_0\Delta I_{1\text{a}} + R_0\Delta I_{1\text{p}}\right), \quad (5)$$

де $\Delta I_{2\text{a}}, \Delta I_{2\text{p}}$ – прирости активної та реактивної складових струму навантаження; $\Delta I_{1\text{a}}, \Delta I_{1\text{p}}$ – прирости активної та реактивної складових струму STATCOM.

Поздовжня складова спаду напруги на лінії електропередачі визначає нестабільність діючого значення напруги у вузлі мережі

$$\left|\Delta U_0\right| \approx \Delta U_{0\text{a}} = R_0\Delta I_{2\text{a}} - X_0\Delta I_{2\text{p}} + R_0\Delta I_{1\text{a}} - X_0\Delta I_{1\text{p}}. \quad (6)$$

STATCOM повинен генерувати струм, який забезпечить компенсацію нестабільності струму навантаження, і, водночас, активна потужність STATCOM повинна бути рівною нулю.

З рівності $\left|\Delta U_0\right| \approx \Delta U_{0\text{a}} = 0$ випливає, що для стабілізації напруги у вузлі мережі необхідним є виконання такої умови

$$\Delta I_{1\text{p}} = \frac{R_0}{X_0}\left(\Delta I_{1\text{a}} + \Delta I_{2\text{a}}\right) - \Delta I_{2\text{p}}. \quad (7)$$

Урахувавши, що $\Delta I_{1\text{a}} = \frac{R_1}{X_1}\Delta I_{1\text{p}}$, і ввівши $k = 1 - \frac{R_1}{X_1}\frac{R_0}{X_0}$, отримуємо

$$\Delta I_{1\text{p}} = \frac{1}{k}\left(\frac{R_0}{X_0}\Delta I_{2\text{a}} - \Delta I_{2\text{p}}\right). \quad (8)$$

Підставивши цей вираз у вираз для поперечної складової спаду напруги на лінії електропередачі, отримуємо

$$\Delta U_{0\text{p}} = \left[X_0 + \frac{R_0}{k}\left(\frac{R_1}{X_1} + \frac{R_0}{X_0}\right)\right]\Delta I_{2\text{a}} + \left[R_0 + \frac{X_0}{k}\left(\frac{R_1}{X_1} + \frac{R_0}{X_0}\right)\right]\cdot\Delta I_{2\text{p}}. \quad (9)$$

Комплексне значення струму STATCOM

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_1}{R_1 + jX_1}. \quad (10)$$

Звідси випливає вираз для ЕРС STATCOM за приростів напруги у вузлі мережі та струму STATCOM

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1^{(0)} + \Delta\dot{U}_1 + \left(R_1 + jX_1\right)\Delta\dot{I}_1, \quad (11)$$

де $\Delta\dot{U}_1$ – комплексне значення приросту напруги у вузлі мережі, який визначається приростом спаду напруги $\Delta\dot{U}_0$.

Отже, задля стабілізації напруги у вузлі мережі ($\Delta U_{1\text{a}} = \Delta U_{0\text{a}} = 0$) значення активної складової ЕРС STATCOM необхідно сформувати таким чином

$$E_{1\text{a}} = U_{1\text{a}}^{(0)} - \frac{X_1}{k}\left(1 - \left(\frac{R_1}{X_1}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{R_0}{X_0}\Delta I_{2\text{a}} - \Delta I_{2\text{p}}\right), \quad (12)$$

а задля забезпечення нульового значення активної потужності STATCOM, умовою якого є рівність $\Delta U_{1\text{p}} = \Delta U_{0\text{p}}$, значення реактивної складової ЕРС STATCOM необхідно сформувати у такому вигляді

$$E_{1\text{p}} \approx U_{1\text{p}}^{(0)} + \Delta U_{0\text{p}} + \frac{2R_1}{k}\cdot\left(\frac{R_0}{X_0}\Delta I_{2\text{a}} - \Delta I_{2\text{p}}\right). \quad (13)$$

Розглянемо можливість компенсації змін напруги джерела живлення.

В [16] запропоновано регулювання STATCOM для компенсації змін напруги джерела живлення здійснювати за формулою

$$\dot{E}_1 \approx \dot{U}_1^{(0)} + \left(\dot{E}_0^{(0)} - \dot{E}_0\right)\cdot\left[\frac{X_1}{X_0} + jq\right], \quad (14)$$

де інформативними параметрами є поточне значення напруги джерела живлення $\dot{E}_0$. Для її визначення можна використати вираз $\dot{E}_0 = \dot{U}_1 + \left(R_0 + jX_0\right)\dot{I}_0$.

Значення q можна знайти розв'язавши систему рівнянь (3), (4) для двох значень $\dot{E}_0^{(0)}$ та $\dot{E}_0^{(1)}$ відносно $\dot{E}_1^{(1)}$ та використавши вираз

$$q = \frac{\mathrm{Im}\left(\dot{E}_1^{(0)}\right) - \mathrm{Im}\left(\dot{E}_1^{(1)}\right)}{\dot{E}_0^{(0)} - \dot{E}_0^{(1)}}. \tag{15}$$

З рівняння (3) випливає

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1^{(0)} e^{j\Delta\psi_1} + \dot{E}_0^{(0)} \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} e^{j\Delta\psi_1} - \dot{E}_0 \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1}, \tag{16}$$

де $\Delta\psi_1$ – приріст початкової фази напруги $\dot{U}_1$ відносно $\dot{U}_1^{(0)}$, що зумовлений збільшенням струму компенсатора.

Використавши формулу Ейлера і врахувавши, що $\cos\Delta\psi_1 \approx 1$, отримуємо

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1^{(0)} + \left(\dot{E}_0^{(0)} - \dot{E}_0\right)\frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1} + j\left(\dot{U}_1^{(0)} + \dot{E}_0^{(0)}\frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_1}\right)\sin\Delta\psi_1. \tag{17}$$

Задля визначення $\sin\Delta\psi_1$ можна використати наближений вираз $\sin\Delta\psi_1 \approx \left(X_0 \cdot \mathrm{Re}(\dot{I}_1) + R_0 \cdot \mathrm{Im}(\dot{I}_1)\right) / \left|\dot{U}_1^{(0)}\right|$, однак застосування цього виразу або виразу $\sin\Delta\psi_1 \approx \left(X_0 \cdot R_1 / X_1 + R_0\right) \cdot \left|\dot{I}_1\right| / \left|\dot{U}_1^{(0)}\right|$ є проблематичним внаслідок відсутності апріорної інформації про струм STATCOM, а також внаслідок істотного впливу $\sin\Delta\psi_1$ на значення уявної складової. Водночас відмінність значень дійсних складових, розрахованих за формулами (14) і (17), є несуттєвими.

Таким чином, рівняння (12) – (14) описують запропонований метод зниження коливань напруги вузла приєднання STATCOM за умови нестабільності навантаження та напруги живлення в розподільних електричних мережах.

Вирази (12), (13) можна дещо спростити без суттєвої втрати точності, знехтувавши у виразі (5) складовою $\Delta I_{2\,\mathrm{a}}$, припустивши, що струм STATCOM випереджає напругу $\dot{U}_1$ на кут $\varphi = \pi/2$

$$\begin{aligned}\Delta U_{0a} + j\Delta U_{0p} \approx \left(R_0\Delta I_{2a} - X_0\Delta I_{2p} - X_0\Delta I_{1p}\right) + \\ + j\left(R_0\Delta I_{2p} + X_0\Delta I_{2a} + R_0\Delta I_{1p}\right).\end{aligned} \tag{18}$$

Тоді вираз (9) для поперечної складової спаду напруги на лінії електропередачі набуде вигляду

$$\Delta U_{0\,\mathrm{p}} \approx X_0\left(1 + \left(\frac{R_0}{X_0}\right)^2\right) \cdot \Delta I_{2\,\mathrm{a}}. \tag{19}$$

Для стабілізації напруги у вузлі мережі у випадку нестабільності навантаження вираз для дійсної складової ЕРС STATCOM можна сформувати таким чином

$$E_{1\,\mathrm{a}} \approx U_{1\,\mathrm{a}}^{(0)} - X_1 \cdot \left(\frac{R_0}{X_0}\Delta I_{2\,\mathrm{a}} - \Delta I_{2\,\mathrm{p}}\right), \tag{20}$$

а для забезпечення нульового значення активної потужності STATCOM значення уявної складової ЕРС STATCOM у такому вигляді

$$\begin{aligned}E_{1\,\mathrm{p}} &\approx U_{1\,\mathrm{p}} + X_0\left(1 + \left(\frac{R_0}{X_0}\right)^2\right) \cdot \Delta I_{2\,\mathrm{a}} + R_1\left(\frac{R_0}{X_0}\Delta I_{2\,\mathrm{a}} - \Delta I_{2\,\mathrm{p}}\right) = \\ &= U_{1\,\mathrm{p}} + \left(X_0 + \frac{R_0}{X_0}\left(R_0 + R_1\right)\right) \cdot \Delta I_{2\,\mathrm{a}} - R_1\Delta I_{2\,\mathrm{p}}.\end{aligned} \tag{21}$$

3. Моделювання роботи STATCOM за умов змінного навантаження та нестабільності напруги джерела живлення. Проведено моделювання роботи STATCOM за таких умов: навантаження з середньою потужністю P_2=4 МВт, Q_2=2 МВАр змінюються в діапазоні, відповідно, (0,75÷1,25)P_2 та (0,75÷1,25)Q_2. Навантаження живиться від силового трансформатора напругою 110/10 кВ, потужністю 10 МВ·А, $u_к$=10,5%. Потужність трансформатора STATCOM 2,5 МВ·А, $u_к$=5,5%.

На рис. 2 наведено залежності напруги у вузлі навантаження і ЕРС STATCOM за напруги джерела живлення 10,5 кВ за зміни навантаження в двох режимах роботи електричної мережі: перший – коли активне навантаження змінюється в діапазоні від $(0{,}75\div1{,}25)P_2$, а реактивне є сталим; другий – коли активне і реактивне навантаження змінюються в діапазоні від $(0{,}75\div1{,}25)P_2$ та $(0{,}75\div1{,}25)Q_2$.

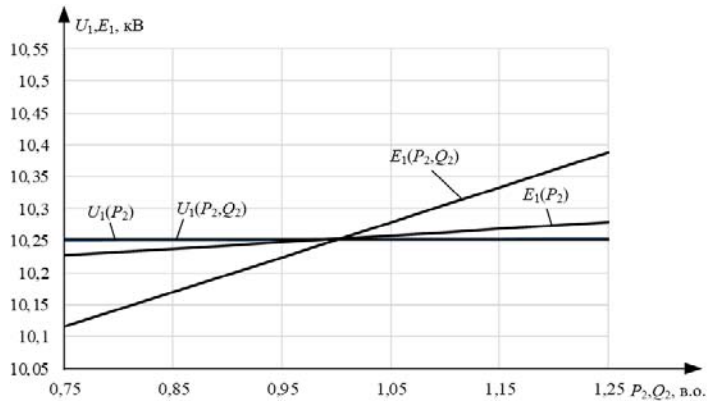


Рис. 2. Графіки напруги вузла навантаження і ЕРС STATCOM за напруги джерела живлення 10,5 кВ

Діапазон зміни напруги в обох режимах $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ однаковий 10,25÷10,253 кВ, що відповідає коефіцієнту нестабільності $k_{\text{нест}}=(\Delta U/U_{\text{н}})\cdot100\%=0{,}03\%$. ЕРС STATCOM за зміни лише активного навантаження змінюється в межах 52 В, а за зміни активного і реактивного навантаження – в межах 273 В. Характер зміни – лінійний.

Процес генерування/споживання реактивної потужності STATCOM зображено на рис. 3. За умови зміни активного навантаження споживача діапазон зміни реактивної потужності знаходиться в межах -103÷110 кВАр. За умови зміни активного та реактивного навантаження діапазон зміни реактивної потужності: -573÷580 кВАр. Діапазон зміни активної потужності, яка генерується/споживається STATCOM, за умови зміни активного навантаження споживача знаходиться в межах від 13 кВт (генерація) до 12 кВт (споживання), а за змінних активної та реактивної потужності споживача – від 13 кВт (генерація) до 4,8 кВт (споживання).

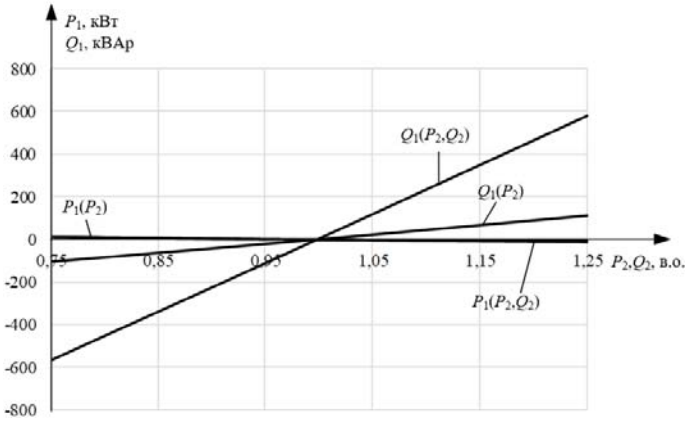


Рис. 3. Графіки генерування/споживання активної та реактивної потужності STATCOM за напруги джерела живлення 10,5 кВ

Здійснено дослідження впливу нестабільності напруги джерела живлення на процес стабілізації напруги у вузлі приєднання навантаження. Для порівняння моделювання виконано за напруги джерела живлення 10,3 кВ, як і раніше, в двох режимах: за змінного активного навантаження вузла, а також за змінних активного та реактивного навантаження споживача.

Діапазон зміни напруги в обох режимах $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ близький до попереднього випадку: 10,249÷10,256 кВ (рис. 4). При цьому ЕРС STATCOM, як і раніше, змінюється приблизно в тому самому діапазоні: за зміни активного навантаження споживача в межах 60 В, а за зміни активного і реактивного навантаження – в межах 291 В.

За зміни активного навантаження і активного та реактивного навантаження споживача діапазон зміни реактивної потужності компенсатора змістився відповідно: 1671÷1908 кВАр і 1188÷2391 кВАр (рис. 5). Результати моделювання показали, що діапазон зміни активної потужності, яка генерується/споживається STATCOM за умови зміни активного навантаження споживача знаходиться в межах від 8 кВт

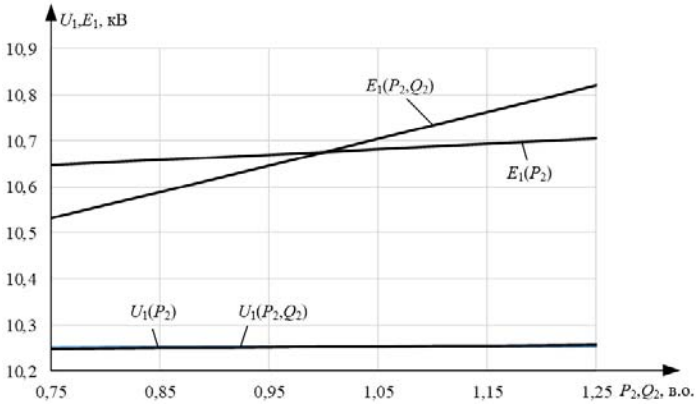


Рис. 4. Графіки напруги вузла навантаження і ЕРС STATCOM за напруги джерела живлення 10,3 кВ

(генерація) до 5 кВт (споживання), а за змінних активної та реактивної потужності споживача – від 5,6 кВт (генерація) до 4,3 кВт (споживання).

Таким чином, за використання умов керування STATCOM (10)–(14) можна досягти стабілізації напруги в розглянутому вузлі електричної мережі за таких змін потужності компенсатора: 200 кВАр на ±25 % зміни активного навантаження та 1200 кВАр на 2% зміни напруги джерела живлення.

Значення ЕРС STATCOM можна пропорційно збільшувати. При цьому значення q залишається таким самим, як і в попередньому випадку. Наприклад, у разі збільшення генерування реактивної потужності на 450 кВАр діапазон зміни напруги в обох режимах навантаження $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ буде однаковим 10,3÷10,303 кВ і дещо вищим від попереднього випадку.

Діапазон зміни реактивної потужності компенсатора в обох режимах $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ знаходиться в межах, відповідно: 350÷571 та -128÷1049 кВАр (рис. 6).

Діапазон зміни активної потужності, яка генерується/споживається STATCOM, за умови зміни активного навантаження споживача знаходиться в межах від 12 кВт (генерація) до 10 кВт (споживання), а за змінних активної та реактивної потужності споживача – від 11 кВт (генерація) до 2,7 кВт (споживання).

Проведено також моделювання за напруги джерела живлення 10,3 кВ в двох режимах: за змінного активного навантаження вузла, а також за змінних активного та реактивного навантаження споживача. Діапазон зміни напруги в обох режимах $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ близькі до попереднього випадку: 10,299÷10,306 кВ.

Діапазон зміни реактивної потужності компенсатора $U_1(P)$ і $U_1(P,Q)$ знаходиться в межах, відповідно 2132÷2378 кВАр і 1641÷2869 кВАр (рис. 7).

Результати моделювання показали, що діапазон зміни активної потужності, яка проходить через STATCOM, за умови зміни активного навантаження споживача є в межах від 8,5 кВт (генерація) до 1,3 кВт (споживання), а за змінних активної та реактивної потужності споживача – 1,9÷8,5 кВт (генерація).

В таблиці для порівняння наведено отримані результати, з яких випливає, що в розглянутому вузлі електричної мережі збільшення реактивної потужності Q_1 приблизно на 450 кВАр приводить до збільшення напруги U_1 на 0,05 кВ.

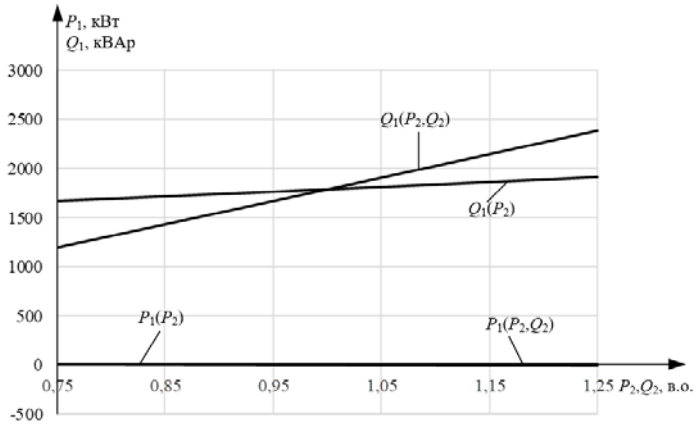


Рис. 5. Графіки генерування/споживання активної та реактивної потужності STATCOM за напруги джерела живлення 10,3 кВ

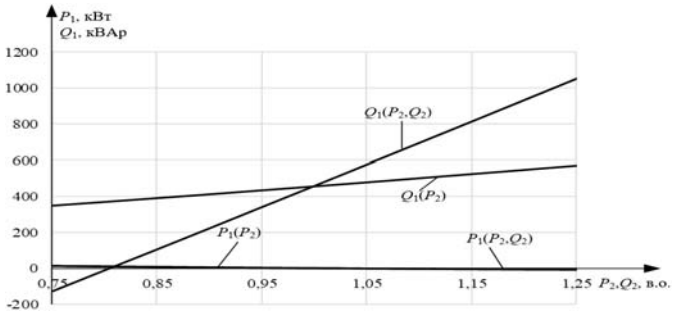


Рис. 6. Графіки генерування/споживання реактивної та активної потужності STATCOM у випадку збільшення ЕРС за напруги джерела живлення 10,5 кВ

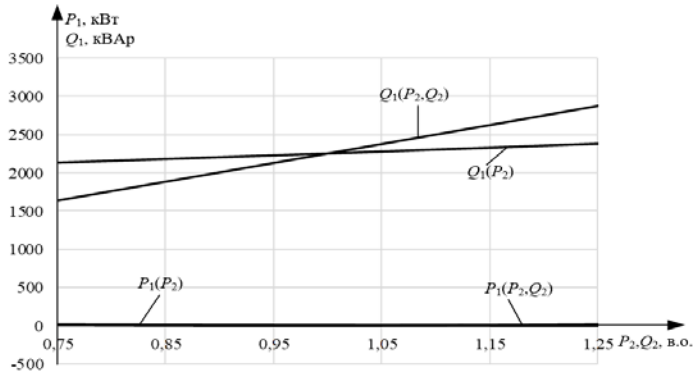


Рис. 7. Графіки генерування/споживання реактивної та активної потужності STATCOM у випадку збільшення ЕРС за напруги джерела живлення 10,3 кВ

$\dot{E}_0$, кВ	$Q_1(P)$, кВАр	$Q_1(P,Q)$, кВАр	U_1, кВ
10,5	-103÷110	-573÷580	10,250÷10,253
10,3	1671÷1908	1188÷2391	10,249÷10,256
10,5	350÷571	-128÷1049	10,300÷10,303
10,3	2132÷2378	1641÷2869	10,299÷10,306

Висновки. Проаналізовано роботу STATCOM в режимі стабілізації напруги вузла електричної мережі. Запропоновано метод керування, який передбачає визначення ЕРС компенсатора на основі інформації про прирости активної та реактивної складових струму навантаження, а також базової напруги в вузлі навантаження, що визначається на основі інформації про базове значення напруги джерела живлення. Проведено моделювання роботи синхронного компенсатора з використанням запропонованих математичних моделей за умови змінних активної потужності навантаження 4 МВт ±25%, реактивної потужності навантаження 2 МВАр ±25%, потужності трансформатора STATCOM 2,5 МВ·А та змін напруги джерела живлення від 10,5 кВ до 10,3 кВ. Задля забезпечення стабілізації напруги на рівні 10,25 кВ реактивна потужність компенсатора коливається в межах -0,57÷2,4 МВАр. Задля збільшення рівня стабілізованої напруги вузла навантаження збільшено значення базової напруги вузла приєднання STATCOM, яка розрахована з використанням параметру q, який в свою чергу визначається за значеннями ЕРС компенсатора і джерела живлення. В такому випадку задля забезпечення стабільної напруги навантаження на рівні 10,3 кВ потужність STATCOM збільшилася на 450 кВАр і лежить в межах -0,13÷2,87 МВАр.

DIRECT STATCOM CONTROL METHOD FOR REDUCING VOLTAGE FLUCTUATIONS AT A DISTRIBUTION NETWORK LOAD BUS

M.Y. Burbelo, O.V. Babenko
Vinnytsia National Technical University,
Khmelnytskyi Highway, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine.
E-mail: oleksij_babenko@ukr.net; burbelom@ukr.net.

The article proposes a method of direct control of the static synchronous compensator (STATCOM) to reduce voltage fluctuations due to load and supply voltage instability in distribution electric networks. The operation of the STATCOM operating in the voltage stabilization mode of the 10 kV distribution electric network node is analyzed. The value of the compensator EMF is obtained, which provides a stable value of the load node voltage when the consumer load conductivity changes. The specified EMF is determined by the values of the increments of the active and reactive components of the load current, the voltage of the compensator connection node at a zero value of the STATCOM reactive current and the parameters of the electric network. The process of voltage stabilization in the load connection node under the condition of changes in the power source voltage and the corresponding compensator control law are analyzed, which involves the use of such informative parameters as the current and base values of the power source voltage, network parameters, and the voltage of the STATCOM connection node. Expressions for determining the EMF of the STATCOM, which provides a stable voltage at the compensator connection point and the load, as well as a zero value of the active power in the compensator circuit under unstable load conditions, as well as changes in the power supply voltage, are obtained. It is shown that for the effective operation of the compensator, it is necessary to measure the load currents and the voltage of the load node. The STATCOM operation is simulated under the condition of changing the active and reactive load of the consumer in the range of ±25% and fluctuations in the power supply voltage within 2%, which is most often observed in electrical networks. It is shown that with an average load power of 2 MVAr and a stabilized voltage of 10.25 kV, the compensator power is in the range from from -0.57 MVAr to 2.4 MVAr. If it is necessary to increase the voltage stabilization level to 10.3 kV, the compensator power increases to 2.8 MVAr. References 16, Figures 7, Table 1.

***Keywords*:** static synchronous compensator (STATCOM), direct control, reactive power, voltage stabilization.

1. Pivniak H.H., Zhezhelenko I.V., Papaika Yu.A. Energy efficiency of the electricity supply system. Dnipro: Natsionalnyi tekhnichnyi univesytet Dniprovska politekhnika, 2018. 148 p. (Ukr)
2. Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 460 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1153-3.
3. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. Chichester: John Wiley & Sons, 2015. 600 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118922064.
4. Wang K., Crow M.L. Power System Voltage Regulation via STATCOM Internal Nonlinear Control. *IEEE* Transactions *on Power Systems*. August 2011. Vol. 26. No 3. Pp. 1252–1262. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2072937.
5. Xu Y., Li F. Adaptive PI Control of STATCOM for Voltage Regulation. *IEEE Transactions On Power Delivery*. June 2014. Vol. 29. No 3. Pp. 1002–1011. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2291576.

6. Gui Y., Kim C., Han Y., Chung C.C. Robust Nonlinear Control of STATCOMs. In book: Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems. Springer, 2015. Pp. 187–224. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-287-281-4_6.
7. Guo A., Tian Y., Zhao H. Highly Robust Active Damping Approach for Grid-Connected Current Feedback Using Phase-Lead Compensation. *Electronics*. 2025. Vol. 14. Issue 2. Article no: 309. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14020309.
8. Yazdani A. Energy and voltage management methods for multilevel converters for bulk power system power quality improvement: PhD dissertation. Rolla: Missouri University of Science and Technology, 2009. 90 p.
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. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. No 9. Article no: 1546. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-020-03315-8.
10. Dash S.K., Mishra S., Abdelaziz A.Y. A Critical Analysis of Modeling Aspects of D-STATCOMs for Optimal Reactive Power Compensation in Power Distribution Networks. *Energies*. 2022. Vol. 15. No 19. Article no: 6908. Pp. 1–23. DOI: https://doi.org/10.3390/en15196908.
11. Chen J.-H., Tan K.-H., Lee Y.-D. Intelligent Controlled DSTATCOM for Power Quality Enhancement. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 11. Article no: 4017. DOI: https://doi.org/10.3390/en15114017.
12. Wang S., Cui K., Hao P. Grid-Connected Inverter Grid Voltage Feedforward Control Strategy Based on Multi-Objective Constraint in Weak Grid. *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 13. Article no: 3288. DOI: https://doi.org/10.3390/en17133288.
13. Alturki Y.A., Alhussainy A.A., Alghamdi S.M., Rawa M. A Novel Point of Common Coupling Direct Power Control Method for Grid Integration of Renewable Energy Sources: Performance Evaluation among Power Quality Phenomena. *Energies*. 2024. Vol. 17. No 20. Article no: 5111. DOI: https://doi.org/10.3390/en17205111.
14. Zhang Z., Gong P., Lu Z. A Lyapunov Theory-Based SEIG–STATCOM Voltage Regulation Control Strategy. *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 19. Article no: 4992. DOI: https://doi.org/10.3390/en17194992.
15. Wang X., Feng F., Peng L., Xiao P., Li Z. Stability Analysis and Virtual Inductance Control for Static Synchronous Compensators with Voltage-Droop Support in Weak Grid. *Electronics*. 2025. Vol. 14. Issue 11. Article no: 2203. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14112203.
16. Burbelo M.Y., Babenko O.V., Lebed D.Yu. Analysis of STATCOM control process under rapid voltage changes. *Visnyk Kremenchukskoho Mykhailo Ostrohradskoho Natsionalnoho Universytetu*. 2025. Vyp. 1 (150). Pp. 284–291. (Ukr) DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.35.

Надійшла 12.12.2025
Прийнята 09.03.2026