

УДК 621.311

**В. М. Сулейманов, канд. техн. наук, проф.; В. А. Баженов, канд. техн. наук, доц.;
Т. Л. Кацадзе, канд. техн. наук, доц.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВСТАВОК ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА СТРУКТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Досліджено структурні властивості електроенергетичних систем, які містять вставки постійного струму. Запропоновано математичні моделі і методи аналізу структурної зв'язності електроенергетичної системи, яка містить вставку постійного струму. Показано, що наявність вставки постійного струму істотно підвищує структурну зв'язність системи.

Вступ

Для організації в асинхронному варіанті ефективної паралельної роботи електроенергетичних систем в світовій практиці широкого поширення набули вентильно-інверторні підстанції (ВІП) або вставки постійного струму (ВПС). Останні виконують ряд функцій, найважливішими з яких є: секціонування крупних енергооб'єднань з метою ефективного управління перетіканнями потужності; забезпечення стійкості роботи слабких зв'язків; підвищення надійності паралельної роботи енергосистем; організація паралельної роботи енергосистем з різними стандартами частоти і якості електроенергії; ефективне забезпечення комерційного експорту і імпорту електричної енергії. В зв'язку з цим ігнорування перспектив використання ВПС в електроенергетиці України може істотно віддалити перспективу об'єднання ОЕС України на паралельну роботу з енергооб'єднанням Євросоюзу УСТЕ.

У вітчизняній практиці дослідження характеристик робочих режимів електричних систем (ЕС) практично відсутні адекватні математичні моделі ВПС, що характеризуються високою точністю і обчислювальною надійністю як для динамічних, так і для сталих режимів ЕС. Це пов'язано, в першу чергу, з великою складністю і істотною нелінійністю елементів ВІП, моделювання яких вимагає розробки спеціальних алгоритмів розрахунку і дослідження параметрів робочих режимів ВПС в нормальних і аварійних ситуаціях.

Матеріали дослідження

Авторським колективом розроблена математична модель ВПС, адаптована до завдань розрахунку параметрів сталих режимів складних ЕС [1, 2]. Серія тестових розрахунків з використанням розроблених моделей ВІП показали високу обчислювальну ефективність і надійність алгоритмів розрахунку режимних характеристик ЕС, особливо з використанням безітераційної моделі ВІП [2].

Авторами проведені також дослідження структурних властивостей ЕС, що містять ВПС. Зокрема, досліджена структурна зв'язність ЕС. В основу дослідження структурної зв'язності ЕС покладено розроблений авторами метод, що базується на математичному апараті q -аналізу [4, 5]. Останній полягає в аналізі симпліціального комплексу S , що відповідає досліджуваній системі і відображає внутрішні структурні зв'язки між об'єктами, що входять до складу ЕС:

$$\mathbf{S}(\Omega, \Lambda) := \langle \Omega; \Lambda \rangle: \Omega \neq \emptyset, \Lambda \subset \Omega \times \Omega,$$

де Ω — множина симплексів, що входять в комплекс S -вершин відповідного орієнтованого графа; Λ — множина нерегульованих пар симплексів Ω , що відображають зв'язки (топологічні, електричні, інформаційні, функціональні) між симплексами — ребер орієнтованого графа.

Основна ідея апарату q -зв'язності полягає в дослідженні таких ланцюжків зв'язку в комплексі S , коли кожен симплекс в ланцюзі має загальну грань певної розмірності з сусідніми симплексами. Таким чином, два симплекси σ_i та σ_j комплексу S будуть зв'язаними ланцюжком q -зв'язності, якщо існує така послідовність симплексів $\{\sigma_{\alpha k}\}_{k=1}^n$ в комплексі S , коли

— σ_{α_1} — грань σ_i ;

- σ_{α_n} – грань σ_j ;
- σ_{α_k} и $\sigma_{\alpha_{k+1}}$ володіють загальною гранню:

$$q(\sigma_i, \sigma_j) := \forall \{ \sigma_{\alpha_k} \}_{k=1}^n \in \Omega: \left(\begin{array}{l} (\lambda(\sigma_{\alpha_1}, \sigma_i) \in \Lambda); \\ (\lambda(\sigma_{\alpha_n}, \sigma_j) \in \Lambda); \\ (\lambda(\sigma_{\alpha_k}, \sigma_{\alpha_{k+1}}) \in \Lambda | k=1 \dots n) \end{array} \right).$$

Розмірність ланцюжка зв'язку визначатиметься мінімальною розмірністю ланок, що входять в ланцюжок:

$$q(\sigma_i, \sigma_j) = \min \left\{ \begin{array}{l} \dim \sigma_i, \dim \sigma_j, \\ \left\{ \dim(\lambda(\sigma_{\alpha_k}, \sigma_{\alpha_{k+1}})) \right\}_{k=1}^n \end{array} \right\}.$$

В результаті для кожного значення розмірності $q = 0, 1, \dots, \dim S$ можна визначити кількість і склад підсистем, що входять в досліджуваний комплекс і зв'язкових для поточного рівня розмірності вигляду

$$Q_{q_i} = \dim \{ q(\mathbf{S}) | q(\mathbf{S}) = q_i \}, i = 0, 1, \dots, \dim \mathbf{S}.$$

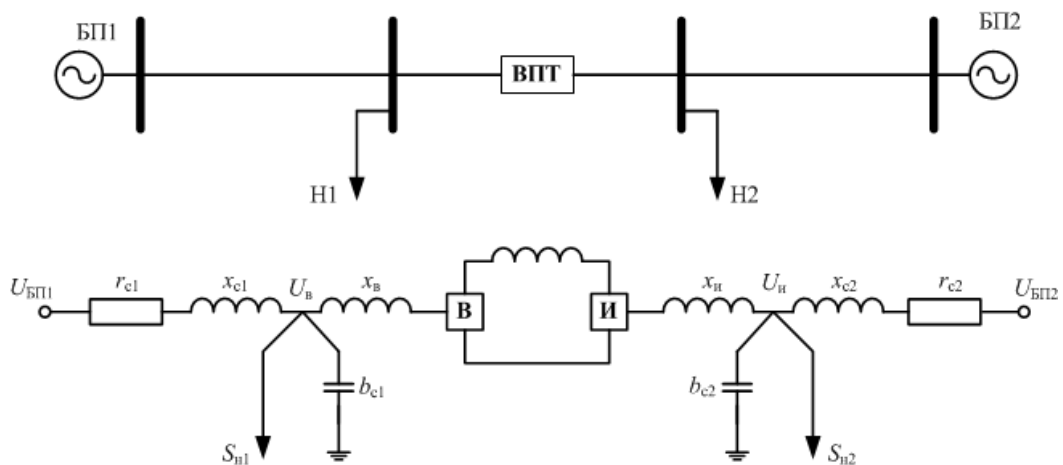
Міра інтеграції кожного окремого симплексу в загальну структуру комплексу в роботі пропонується оцінювати за допомогою ексцентриситету за виразом

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\hat{q} - \check{q}}{\check{q} + 1},$$

де \hat{q} – розмірність симплексу σ ; \check{q} – найбільше значення q , з яким симплекс стає зв'язаним з будь-яким іншим симплексом з комплексу \mathbf{S} .

Очевидно, що для повністю ізольованих симплексів ($\check{q} = -1$) значення ексцентриситету дорівнює ∞ . Для тривіального випадку – симплекс має єдиний зв'язок з комплексом – $\hat{q} = \check{q} = 0, \varepsilon = 0$. У всіх останніх випадках ексцентриситет матиме позитивне дійсне значення. Великі значення ексцентриситету свідчать про високу зв'язність симплексу. Іншими словами, чим вище значення ексцентриситету, тим більше каналів обміну енергією має даний симплекс, і, отже, тим менший вплив на процеси обміну енергією надаватимуть зовнішні обурення, що приводять до розриву одного із зв'язків симплексу.

Дослідження структурної зв'язності ЕС, що містить ВПС, проводилися з використанням розроблених авторами математичних моделей ВПС в сталому режимі ЕС. Для дослідження була використана проста ЕС, показана на рисунку.



Розрахункова схема електричної системи, що містить вставку постійного струму

ЕС містить дві лінії електропередачі, зв'язані між собою ВПС, яка розділяє систему на дві незалежні по частоті підсистеми П1 і П2. Кожна з ліній електропередачі отримує живлення

від шин нескінченної потужності, представлених в розрахунковій моделі як балансуєчі пункти. Ці ж вузли є опорними по напрузі. Лінії електропередачі і ВПС забезпечують живлення двох зосереджених навантажень, прикладених на шинах ВІП. Параметри розрахункової схеми складають:

$$\begin{aligned} z_{c1} &= 0,1 + j0,3 \text{ Ом}; & z_{c2} &= 0,2 + j0,5 \text{ Ом}; & b_{c1} &= 0,014 \text{ См}; & b_{c2} &= 0,014 \text{ См}; \\ x_B &= 0,8 \text{ Ом}; & x_H &= 0,7 \text{ Ом}; & U_{\text{ВІП1}} &= 112 \text{ кВ}; & U_{\text{ВІП2}} &= 112 \text{ кВ}; \\ I_{d\text{max}} &= 12 \text{ кА}; & \dot{S}_{\text{H1}} &= 1000 - j400 \text{ МВА}; & \dot{S}_{\text{H2}} &= 2000 - j500 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Для дослідження структурної зв'язності ЕС, що містить ВПС, розглянуто три варіанти виконання системи передачі електричної енергії з використанням і без вживання ВПС.

1. Підсистеми П1 і П2 не мають електричного зв'язку і функціонують незалежно.
2. Підсистеми П1 і П2 функціонують синхронно, шини навантажень з'єднані в один вузол.
3. Підсистеми П1 і П2 функціонують асинхронно і з'єднані на паралельну роботу через ВПС.

Для всіх варіантів передбачено варіювання потужності P_{H2} в діапазоні 1000...4000 °МВт, причому у варіанті 3 активна потужність в об'ємі 0...3000 МВт надходить через ВПС.

Зіставленню підлягали значення ексцентриситетів вузла навантаження на шинах інверторного блока. Результати розрахунків зведені у таблицю.

$P_{\text{ВІП}} (P_2)$, МВт	ε_2		
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
0 (1000)	1,18	2,48	2,53
500 (1500)	1,08	2,43	2,53
1000 (2000)	0,95	2,37	2,52
1500 (2500)	0,87	2,32	2,52
2000 (3000)	0,81	2,26	2,51
2500 (3500)	0,73	2,21	2,50
3000 (4000)	0,65	2,15	2,49

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки. Перший варіант формування ЕС не передбачає резервування живлення споживачів досліджуваного вузла. Саме тому величина ексцентриситету в цьому варіанті є найменшою. Зниження величини ексцентриситету зі зростанням потужності навантаження пояснюється тим, що наслідки аварійного відключення однієї з живлячих ліній тут будуть катастрофічнішими.

Для другого варіанту формування ЕС навантаження \dot{S}_{H2} покривається одночасно від двох джерел живлення. Це визначає вищі значення ексцентриситету для другого варіанту. Зниження величини ексцентриситету зі зростанням потужності навантаження пояснюється тими ж міркуваннями, що і для першого варіанту. Зауважимо, що в другому варіанті формування ЕС розподіл навантаження між джерелами живлення є природним і некерованим.

Для третього варіанту навантаження \dot{S}_{H2} також покривається одночасно від двох джерел живлення. Проте розподіл потужності навантаження між джерелами живлення внаслідок наявності ВПС буде вже керованим. Це відповідає найвищим значенням ексцентриситету вузла навантаження. До того ж керованість системи електропередачі визначає практично незмінне значення ексцентриситету за будь-яких значень навантаження ВПС. Неістотне зниження ексцентриситету пояснюється впливом режиму реактивної потужності ВПС з боку інверторного блоку на показники структурної зв'язності ЕС.

Висновки

1. Регульована автоматична ВПТ є складним нелінійним елементом, що різко погіршує умови збіжності ітераційного розрахунку параметрів сталого режиму ЕС. Ця обставина висуває жорсткі вимоги до надійності математичних моделей і алгоритмів роботи ВПС, перш за все, в умовах сталих режимів роботи ЕС.
2. Розроблені авторами математичні моделі ВПС в сталому режимі ЕС дозволяють проводити ефективний ітераційний розрахунок режимних параметрів ЕС, що містить ВПС.
3. Запропонований метод дослідження структурних властивостей ЕС дозволяє ефективно оцінювати структурну зв'язність ЕС, що містить ВПС.
4. На основі розроблених математичних моделей ВПС в сталому режимі ЕМ проведено аналіз структурної зв'язності ЕС, що містить ВПС, який свідчить про те, що наявність ВПС в ЕС істотно підвищує її структурну зв'язність практично незалежно від навантаження системи.
5. Розроблені авторами математичні моделі, методи і алгоритми дослідження структурних властивостей ЕС, що містять ВПС, дозволяють на попередньому етапі відібрати найперспективніші варіанти розвитку системи за умовами структурної зв'язності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сулейманов В. Н. Моделирование установившихся режимов электрических систем, содержащих вставки постоянного тока / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе, Н. Н. Лучин // Энергетика: Экономика, технологии, экология. — 2007. — № 1. — С. 84—89.
2. Сулейманов В. Н. Розробка математичних моделей та методів забезпечення оптимальної паралельної роботи енергосистем України : звіт про НДР УкрНТІ № 0207U008826 / В. Н. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. — Київ, 2007. — 125 с.
3. Поссе А. В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока / А. В. Поссе. — Л. : Энергия, 1973. — 304 с.
4. Сулейманов В. Н. Математический аппарат структурного анализа электроэнергетических систем / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2005. — Вип. 3/2005 (32). — С. 201—202.
5. Кацадзе Т. Л. Анализ функционирования электрических систем на основе структурной связности : автореферат дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / Т. Л. Кацадзе. — К. : ІВЦ вид-во «Політехніка», 2002. — 21 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 20.11.11

Сулейманов Віктор Миколайович — професор, **Баженов Володимир Андрійович** — доцент, **Кацадзе Теймураз Луарсабович** — доцент.

Кафедра електричних мереж і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ