

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ, НАДІЙНОСТІ ЖИВЛЕННЯ ТА РІВНЯ ЕМС В СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

Система живлення електрифікованого транспорту в Україні має свої особливості [2]. По-перше, схеми електропостачання виконані як на постійному, так і на змінному струмі, що викликає труднощі у виборі методів оцінки впливу спотворюючих факторів на електромагнітну сумісність (ЕМС) системи в цілому. По-друге, використання пристроїв силової електроніки (СЕ) викликає появу вищих гармонічних складових, що негативно впливає на ефективність передачі електричної енергії по лініях електропередачі.

Особливістю функціонування систем живлення електрифікованого транспорту (СЖЕТ) з джерелами розосередженої генерації є різноманітність режимів роботи генеруючого обладнання та наявність пристроїв СЕ, які як вносять спотворення сигналів, так і забезпечують корекцію режимів роботи мережі.

Зі зростанням кількості приладів керування та нелінійних елементів системи, проблема забезпечення ЕМС в сучасних системах електропостачання дедалі стає більш актуальною.

Розташовуючи обладнання в певну систему, що представлена сукупністю електромагнітних явищ, які визначаються як електромагнітне оточення (ЕМО), ми маємо забезпечити надійну роботу цього обладнання і не завадити надійній роботі іншого обладнання, тобто забезпечити електромагнітну сумісність всіх елементів [1].

Для аналізу та оцінки рівня ЕМС у електрифікованому транспорті пропонується використовувати показники стійкості системи та аналіз складових реактивної потужності Фризе Q_{ϕ} , як характеристики неоптимальності процесів [3].

Через складність явищ та процесів, що відбуваються у великих електроенергетичних системах, «фізичне» поняття стійкості та надійності для зручності моделювання традиційно розкладають на складові [3]. В країнах колишнього СРСР була досить поширена математична декомпозиція стійкості на поняття «стійкість паралельної роботи енергосистем» та «стійкість навантаження» [1]. У той же час, в країнах Європейського енергетичного об'єднання використовується дещо інша класифікація цього явища: «стійкість за кутом» та «стійкість за напру-

гою» [1, 5]. Зазначимо, що використання підходу до оцінки стійкості системи за напругою дозволяє більш чітко розділити загальне поняття на окремі математичні складові.

Вимоги до стійкості електроенергетичних систем можуть забезпечуватись за рахунок: посилення електричної мережі; зменшення часу відключення КЗ шляхом удосконалення та оптимізації налаштування пристроїв апаратури повторного включення; використання автоматичного захисту підстанцій; зміни режимів роботи енергосистем.

При аналізі техніко-економічних характеристик поняття стійкості розглядається як властивість системи поглинати зовнішні збурення, а саме – зберігати стан рівноваги або незначно відхилятися від нього під дією цих збурень [3].

У окремих фрагментах СЖЕТ поняття стійкості можна розкрити як спроможність системи протидіяти малим збуренням, дія яких направлена на виведення її зі стану рівноваги та можливість системи повернутися до цього стану. Для оцінки стійкості таких систем використовуються алгебраїчні та частотні критерії стійкості (критерії стійкості по Ляпунову, критерії Найквіста та Михайлова), що дозволяють визначати стійкість даних систем без вирішення складних характеристичних рівнянь [4].

Практично оцінка стійкості в СЖЕТ може полягати у визначенні запасу стійкості або ж ступеня стійкості системи у відповідності до появи ustalених та аномальних режимів та процесів.

Згідно з вище викладеним поняття статичної стійкості – це спроможність системи повертатися до початкового стану після припинення дії малих збурень, які вивели її з цього стану. За умовами статичної стійкості енергосистем нормують мінімальні коефіцієнти запасу з активної потужності в перетинах і мінімальні коефіцієнти запасу з напруги у вузлах навантаження [2]. Крім того, встановлюють групи збурень, за яких повинні забезпечуватись як динамічна стійкість, так і нормативні запаси статичної стійкості в після-аварійних режимах, а в допустимій області режимів має забезпечуватись відсутність «само-розхитування» системи [3].

При оцінці стійкості у виділених системах важливими показниками є керованість та спостережуваність режимів, як обладнання, так і системи в цілому. Виділяються такі сторони аналізу стійкості: термічна стійкість ліній, стійкість щодо відпрацювання сигналів регулювання, стійкість на основі оцінки обмінних процесів, стійкість щодо зміни параметрів генераторів та стійкість відносно пропускної спроможності ліній електропередачі [2]. Важливим критерієм забезпечення керованості процесів СЖЕТ є стійкість на основі оцінки обмінних процесів.

Як приклад, розглянемо систему, в якій здійснюється компенсація реактивної складової струму генератора. Струм, який генерує компенсуючий пристрій (КП) – $i_{\text{КП}}(t)$, складається зі струму, що генерується пасивним фільтром (ПФ) – $i_{\text{Р,ПФ}}(t)$ та струму, що генерується активним фільтром (АФ), $-i_{\text{Р,АФ}}(t)$, має місце наступне співвідношення

$$i_{\text{КП}}(t) = i_{\text{Р,ПФ}}(t) + i_{\text{Р,АФ}}(t).$$

В ідеальному випадку КП повністю компенсує обидві складові. У реальних умовах частка струму, яка буде скомпенсована ПФ, – $i_{\text{Р,ПФ}}(t)'$. Має місце рівність $i_{\text{Р,ПФ}}(t)' \neq i_{\text{Р,ПФ}}(t)$. У залежності від схемотехнічної реалізації ПФ нев'язка $\Delta = \|i_{\text{Р,ПФ}}(t) - i_{\text{Р,ПФ}}(t)'\|$ характеризує відмінність струмів як за амплітудами $\{\Delta i(t)_A\}$, так і за початковими фазами $\{\Delta i(t)_\psi\}$, обумовлену появою «нескомпенсованої» складової струму $i_{\text{Р,ПФ}}(t)'' = i_{\text{Р,ПФ}}(t)' - i_{\text{Р,ПФ}}(t)$, яку ПФ не може скомпенсувати. Дана складова струму може порушити стійкість роботи компенсуючого пристрою та як наслідок і всієї системи. В залежності від величини $i_{\text{Р,ПФ}}(t)''$ система умовно може знаходитися в зоні повної стійкості (тобто при $i_{\text{Р,ПФ}}(t)'' = 0$), відносної стійкості ($i_{\text{Р,ПФ}}(t)'' \geq 0$ при короткочасних змінах режимів роботи СЖЕТ) або ж в зоні порушення стійкості (тобто при $i_{\text{Р,ПФ}}(t)'' \gg 0$) [4]. Зазначимо, що режим «відносної стійкості» системи потребує уточнення, більш детального дослідження та розрахунку, через свою короткочасність та часто невелику чисельну величину.

Для більш точного визначення рівнів порушення стійкості та надійності роботи СЖЕТ доцільно використати обмінні потужності [3]. Величина $Q_{\text{об}}$ може розглядатися як інтегральна характеристика впливу різних факторів не-

кисності електроенергії на обмінні процеси в колах змінного та постійного струму, яка обчислюється за наступним виразом:

$$Q_{\text{об}} = \frac{1}{T} \int_0^T |P_H(t)| dt; \quad (1)$$

$$Q_{\text{об}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)i_\infty(t)| dt = \frac{U}{T} \int_0^T |i_\infty(t)| dt, \quad (2)$$

де $P_H(t) = u(t) \cdot i_P(t)$, причому рівняння (2) дозволяє визначити обмінні потужності для системи постійного струму (для $U = \text{const}$, $i_P(t) = i_\infty(t)$, оскільки у лініях постійного струму енергія споживається на першій гармоніці тому всі вищі гармонійні складові є виключно реактивні, оскільки вони не передають енергію від джерела живлення).

Запропонований підхід до оцінки процесів в СЖЕТ дозволяє при розділенні режимів роботи елементів системи виділити граничні режими, які визначають межі стійкості за зміною режимів роботи системи та можливістю регуляторів компенсувати збурення, що виникають в даних системах.

Окремо необхідно виділити складові втрат активної потужності від різних факторів неясності електромагнітних процесів (складові потужності Фризе Q_Φ).

Застосувавши декомпозиції Q_Φ , що у загальному випадку має вигляд [9]:

$$Q_\Phi^2 = U^2 \frac{I_{m(1)}^2 \sin^2(\varphi_k)}{2} + U^2 \left[\left(I_0 - \frac{PU_0}{U^2} \right)^2 + \sum_{n,k,n \neq k} \frac{\left(I_{m(k)} \cos \varphi_n - PU_{m(k)} / U^2 \right)^2}{2} + \sum_{n,n \neq k} \frac{I_{m(n)}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k,k \neq n} \left(PU_{m(k)} / U^2 \right) \right], \quad (3)$$

де $U_{m(k)}, I_{m(k)}, P$ – амплітудні значення напруг струмів k -ї гармоніки, а також значення потужності; складова $\left(U^2 \frac{I_{m(1)}^2 \sin^2(\varphi_k)}{2} \right)$ – повна реактивна потужність, яку можна скомпенсувати за допомогою «лінійної частини» двополосника, що складається з лінійних індуктивностей та ємностей, а решта виразу (3) представляє собою реактивну потужність, яку можна скомпенсувати за допомогою «нелінійної частини» двополосника.

При розгляді реальних умов роботи систем, формула (3) перетворюється та можна використовувати її спрощення систематизовані у таблиці, в якій пункти таблиці відповідають різним прикладам систем живлення.

Як приклад проведемо розрахунок реактивної потужності для систем представлених пунктами 2.1 та 2.3 у таблиці:

Для виділених систем форму напруги можна описати рівнянням: $u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \psi_1^u)$, де U_0 – постійна складова напруги; U_1 – амплітудне значення першої вищої гармонічної складової напруги.

Форма струму описується виразом:

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \psi_1^i) + I_3 \sin(3\omega t + \psi_3^i),$$

де I_0 – постійна складова струму; I_1, I_3 – амплітудні значення струмів першої та третьої гармонік.

Покладемо, що I_1 змінюється від 2 А до 20 А з кроком 1 А; I_0 приймає значення 400 А та 500 А, $I_3 = \text{const}$.

Результати розрахунків зміни величини $Q_\Phi = f(I_1)$ приведено на рисунку.

Формули для визначення величини Q_Φ^2 за пунктами 2.1 та 2.3 таблиці відрізняються на складову $(I_0^2 U_1^2 - P_0 P_1)$. При використанні даного підходу можна визначити уточнене значення Q_Φ , оскільки, видно з рисунку в ході розрахунків складова $(I_0^2 U_1^2 - P_0 P_1)$ обумовлює появу $\Delta Q_\Phi = \left| Q_{\Phi(2.1)} - Q_{\Phi(2.3)} \right|$.

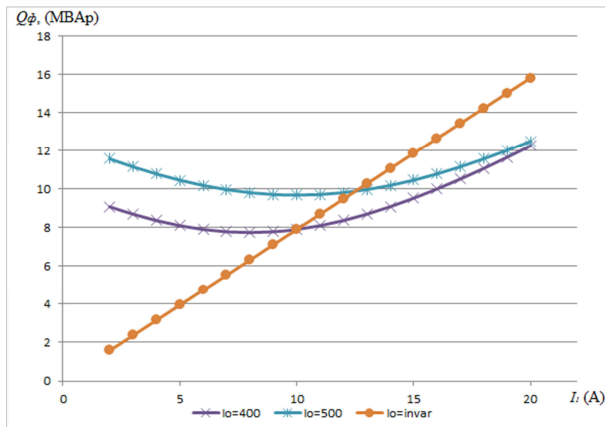


Рис. 1. Залежність $Q_\Phi = f(I_1)$

Дана величина характеризує собою відмінність величин Q_Φ при підходах описаних пунктами 2.1, 2.3 таблиці, при різних значеннях

струму I_1 , що свідчить про більшу точність першого підходу (пункт 2.1 таблиці).

Як можна бачити з рисунку, функції Q_Φ для першого підходу нелінійні, в подальшому знайдемо екстремуми цих функцій, щоб оцінити величини ΔQ_Φ .

Для подальшого вирішення задачі оптимізації процесів у виділених системах використаємо наступні вирази:

$$\frac{dQ_\Phi^2}{dI_0} = 2I_0 U_1^2 - P_1 U_0 = 0; \quad (4)$$

$$\frac{dQ_\Phi^2}{dU_1} = 2U_1 I_0^2 - U_1 (I_1^2 + I_3^2) - I_1 P_0 \cos \phi_1 = 0; \quad (5)$$

$$\frac{dQ_\Phi^2}{dU_0} = U_0 (I_1^2 + I_3^2) - I_0 P_1 = 0; \quad (6)$$

$$\frac{dQ_\Phi^2}{dI_1} = I_1 (U_0^2 + U_1^2) - U_1 P_0 \cos \phi_1 = 0. \quad (7)$$

Як приклад для визначення параметрів системи, при яких значення Q_Φ буде мінімальним, визначимо значення I_0, I_1, U_0, U_1 функцій:

$$I_0 = \frac{P_1 U_0}{2U_1^2} = 40 \text{ А}; \quad (8)$$

$$U_1 = \frac{I_1 P_0 \cos \phi_1}{2I_0^2 - I_1^2 - I_3^2} = 10 \text{ В}; \quad (9)$$

$$U_0 = \frac{I_0 P_1}{I_1^2 + I_3^2} = 1000 \text{ В}; \quad (10)$$

$$I_1 = \frac{U_1 P_0 \cos \phi_1}{U_0^2 + U_1^2} = 2,5 \text{ А}. \quad (11)$$

За отриманими даними можна зробити висновки, що наведений вище підхід дозволяє, розв'язавши оптимізаційну задачу визначити оптимальні режими електропостачання з точки зору додаткових втрат.

Пропонується використовувати наведений вище підхід декомпозиції реактивної потужності Фризе як універсальний для всіх СЖЕТ, як постійного струму, так і змінного, завдяки спрощенням наведеним в таблиці.

Спрощенні рівняння для визначення величини Q_{ϕ}^2

№	Математичний опис системи	Допущення	Величина Q_{ϕ}^2 після спрощення
1.1	$u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \psi_1^u)$	$U_1 = 0$	$U_0^2 I_1^2 / 2$
1.2	$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \psi_1^i)$	$I_0 = 0 \Rightarrow P_0 = 0$	$I_1^2 (U_0^2 + U_1^2) / 2$
2.1	$u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \psi_1^u)$	$P_1 \approx 0$	$I_0^2 U_1^2 + (U_0^2 + U_1^2)(I_1^2 + I_3^2) / 2 - P_0 P_1$
2.2	$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \psi_1^i) +$	$U_1 = 0$	$P_1^2 + U_0^2 (I_1^2 + I_3^2) / 2$
2.3	$+ I_3 \sin(3\omega t + \psi_3^i)$	$I_0 = 0 \Rightarrow P_0 = 0$	$(U_0^2 + U_1^2)(I_1^2 + I_3^2) / 2$
3.1	$u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \psi_1^u) +$	$P_1 \approx 0$	$(U_0^2 + U_1^2 + U_3^2)(I_0^2 + I_1^2 / 2) - P_1 P_0 - P_0^2$
3.2	$+ U_3 \sin(3\omega t + \psi_3^i)$	$U_1 = 0$	$U_3^2 (I_0^2 + I_1^2 / 2) + I_1^2 U_0^2 / 2 + P_1$
3.3	$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \psi_1^i)$	$I_0 = 0 \Rightarrow P_0 = 0$	$I_1^2 (U_0^2 + U_1^2 + U_3^2) / 2$
4.1	$u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \psi_1^u) +$	$P_1, U_1 = 0$	$I_0^2 U_3^2 + U^2 (I_1^2 + I_5^2) / 2$
	$+ U_3 \sin(3\omega t + \psi_3^u)$		
4.2	$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \psi_1^i) +$	$U_1 = 0$	$[(U_0^2 + U_3^2)(I_1^2 + I_5^2) + P_1^2 U_3^2 - (P_0^2 + P_0 P_1) U_0^2] / 2$
4.3	$+ I_5 \sin(5\omega t + \psi_5^i)$	$I_0 = 0 \Rightarrow P_0 = 0$	$(U_0^2 + U_1^2 + U_3^2)(I_1^2 + I_5^2) / 2$

В поєднанні з оцінкою обмінних процесів, яка дозволяє точно оцінити напрямки та величини перетоків реактивної потужності, що дозволяє більш точно оцінити рівні ЕМС на всіх рівнях живлення електрифікованого транспорту, незалежно від територіальних та технічних особливостей, а також меж та зони стійкості режимів роботи СЖЕТ.

Досвід використання нормативних документів показав доцільність їхнього доповнення додатковими характеристиками та показниками, які дозволяють провести аналіз неоптимальності процесів охарактеризувати процеси в системах постійного та змінного струму при наявності спотворюючи вищих гармонік струму [6, 7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буткевич О.Ф., Запаси статичної стійкості та пропускна спроможність контрольованих перетинів енергосистем – деякі ретроспекції та сьогодення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – Вип. 18. – С. 3 – 12.
2. ГКД 34.20.575-2002 // Стійкість енергосистем, керівні вказівки / К.: ОЕП «Гріфре», 2009. – 23 с.
3. Денисюк С.П., Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією / Денисюк С.П., Дерев'яно Д.Г., Колесник П.С. // Зб. пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. вип. – 2011. – С. 30 – 37.
4. Денисюк С.П., Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень / Денисюк С.П., Рибіна О. Б., Дерев'яно Д.Г. // Спец. випуск Праць Ін-ту електродинаміки НАН України (Матеріали I Міжна-

родної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС'10», – К.: ІЕД НАНУ, 2010 С. 32 – 43.

5. Кириленко О.В., Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою // Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Зорін С.В., // Технічна електродинаміка. – К.: ІЕД НАНУ, – 2010. – № 3. – С. 59 – 67.

6. Сиченко В.Г. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму / В.Г.Сиченко, В.А. Зубенко, Д.О. Босий, М.О. Фесик, В.М. Козачок, В.М.Коротун //Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ.-2008.- Вип. 81. – С. 53 – 60.

7. Сиченко В.Г. Проблеми електромагнітної сумісності підсистеми електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення / В.Г. Сиченко, М.В.Панасенко, Ю.П.Гончаров // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – Вип.2. – С. 22 – 29.

8. Сиченко В.Г. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму //Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2008. – Вип. 18, ч.2. – С. 35 – 39.

9. Тонкаль В.Е. Баланс енергій в електрических цепях / Тонкаль В.Е., Новосельцев О.В., Денисюк С.П., и др. //НАН України. Ін-т пробл. енергозбереження. – Київ: Наук. думка, 1992. –312 с.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, реактивна потужність Фризе, стійкість, декомпозиція.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, реактивная мощность Фризе, устойчивость, декомпозиция.

Keywords: stability, decomposition, electromagnetic compatibility, reactive power by Frize.