

ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ДІЛЯНЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Представив д.т.н., професор Гетьман Г.К.

Головним напрямом розвитку залізниць України є модернізація їх інфраструктури, виходячи з необхідності реалізації швидкісного руху.

Відомо, що впровадження швидкісного руху потребує модернізації системи тягового електропостачання, оскільки висуваються більш жорсткі вимоги до режиму напруги в тяговій мережі та значно зростають тягові потужності.

Значно зменшити капітальні затрати на збільшення встановленої потужності тягових підстанцій можна за рахунок оптимального режиму компенсації реактивної потужності.

Компенсація реактивної потужності в системах тягового електропостачання застосовується для поліпшення режиму напруги, зменшення втрат електроенергії та зменшення плати за перетікання реактивної потужності [1, 2].

Особливістю тягового навантаження є його різка зміна в часі. Тобто реактивна потужність компенсуючого пристрою має постійно змінюватись відповідним чином з метою уникнення режимів перекомпенсації. Такі пристрої встановлюються на тягових підстанціях у розподільчих установках 27,5 кВ. Крім того, наявність в системі тягового електропостачання вищих гармонік напруг і струмів суттєво знижує надійність роботи зазначених пристроїв.

Для компенсації реактивної потужності з початку електрифікації на тягових підстанціях змінного струму було передбачене застосування пристроїв поперечної компенсації – набір батарей конденсаторів послідовно з реактором. Наявність реактора в контурі компенсації зменшує генеровану реактивну потужність, проте унеможливує виникнення резонансних явищ та при певному налаштуванні на частоту, близьку до резонансної, сприяє зменшенню обраної гармонійної складової (найчастіше третьої).

Недоліком таких пристроїв є надлишкова генерація реактивної потужності у разі зменшення чи відсутності тягового навантаження. В такому випадку енергопостачальними компаніями додатково нараховуються штрафні

санкції за надлишкове перетікання реактивної потужності.

З 2008 року розпочато впровадження автоматичних плавно регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності. Конструктивно ці пристрої доповнюються контуром декомпенсації, який складається з реактора та силового напівпровідникового регулятора змінного струму. Основна складова капітальних затрат припадає саме на пристрій автоматичного регулювання та сучасні напівпровідникові пристрої на струми до 300 А та напругу 27,5 кВ.

Для виконання розрахунків навантажень ділянки тягового електропостачання необхідно створити математичну модель, використовуючи дані реалізацій потужностей на тягу поїздів, напруги на головних приєднаннях тягової підстанції, паспортні дані трансформаторів – для визначення струмів фідерів тягових підстанцій, напруги у вузлах приєднання контактної мережі до тягових підстанцій, втрати електроенергії в елементах мережі. Змінюючи місце підмикання контуру декомпенсації, можна визначити оптимальний режим роботи компенсуючих пристроїв.

Щоб врахувати взаємозв'язок систем зовнішнього та тягового електропостачання, необхідно скласти схему заміщення використовуючи трансформаторні зв'язки. Складемо таку схему електрифікованої ділянки наступним чином (рис. 1)

Особливість заступних схем електричних мереж з трансформаціями полягає в тому, що однією з вершин кожної вітки, що має зв'язок через трансформацію з будь-якою іншою віткою, є нейтраль (рис. 2). Тому кожен трансформатор приводить до збільшення на одиницю кількість незалежних контурів порівняно зі схемою, приведеною до однієї базисної напруги. Тим часом це не збільшує порядок матриці, для якої потрібне визначення оберненої в процесі розв'язання задачі, бо порядок цієї матриці менший від числа незалежних контурів схеми на кількість трансформацій [3].

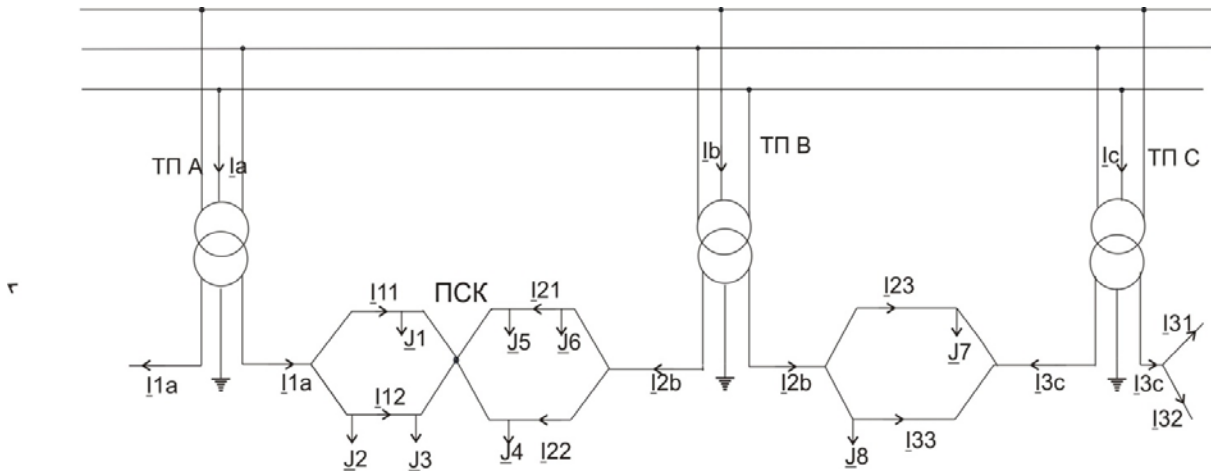


Рис. 1. Схема заміщення ділянки тягового електропостачання

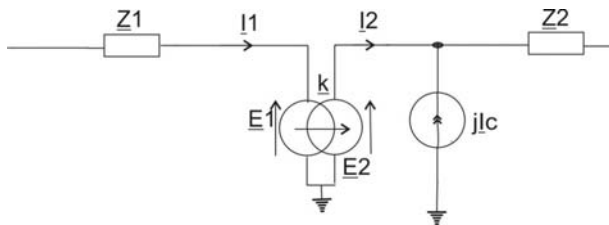


Рис. 2. Заступна схема частини кола з трансформацією та пристроєм компенсації

Якщо позначити ЕРС трансформації \underline{E}_τ , то узагальнене рівняння стану для заступної схеми з трансформатором можна записати у вигляді:

$$\begin{bmatrix} M \\ N \cdot \underline{Z}_B \end{bmatrix} \cdot [\underline{I}] = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ \underline{E}_K \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де матриця контурних ЕРС

$$[\underline{E}_K] = N([\underline{E}] + [\underline{E}_\tau]);$$

$[\underline{E}_\tau]$ - матриця ЕРС трансформацій;

$[\underline{E}]$ - матриця інших ЕРС у вітках схеми

Перенумеруємо вітки схеми так, щоб останні τ віток дерева виявились зв'язаними з першими τ хордами через трансформації. Тоді матриця комплексних коефіцієнтів трансформації виявиться діагональною:

$$[\underline{k}] = \begin{bmatrix} \underline{k}_1 & \dots & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ & \dots & \underline{k}_n \end{bmatrix}$$

В результаті розв'язку системи (1) з урахуванням трансформацій напруги матриця напруг $[\underline{U}_\Delta]$ на границях віток відносно базисного вузла визначається через матриці вузлових операторів $[\underline{Z}]$ і коефіцієнтів $[\underline{D}]$ розподілення ЕРС

$$[\underline{U}_\Delta] = [\underline{Z}] \times [\underline{J}] + [\underline{D}] \times [\underline{E}], \quad (2)$$

де в матрицю $[\underline{E}]$ повинні входити ЕРС, що включені в схему, окрім ЕРС трансформації.

На відмінність від випадків розрахунку схем однієї номінальної напруги (в тому числі й приведених до однієї номінальної напруги) тут у матрицю $[\underline{J}]$ входять фактичні значення задаючих струмів, які обчислюються за фактичних значень напруги на всіх ділянках мережі.

Вектор струмів у вітках визначається матричною залежністю

$$[\underline{I}] = [\underline{Z}_B]^{-1} \times [\underline{M}]^T \times [\underline{U}_\Delta], \quad (3)$$

де $[\underline{Z}_B]^{-1} = [\underline{Y}_B]$ - діагональна матриця провідностей кола; $[\underline{M}]^T$ - транспонована матриця інцидентій у вузлах.

Далі визначаються втрати потужностей на ділянках і в трансформаторах.

Отримані розв'язки в результаті складають вхідні дані для компенсації реактивної потужності.

Відома формула [4] визначення потужності компенсуючого пристрою (КП)

$$Q_K = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (4)$$

де Q_K - реактивна потужність КП, квар;
 P - активна потужність споживача, кВт;

$(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$ - коефіцієнти реактивної потужності до компенсації та після неї, відповідно.

Одним з впливаючих параметрів в задачі оптимізації є струм компенсуючого пристрою I_C . Цей струм обмежується по величині регулювання встановленою потужністю компенсатора Q_K , для визначення якої можна скористатись відомою формулою (4).

Ефективність застосування різних типів компенсації з тими чи іншими параметрами доцільно оцінювати за різницею втрат потужностей в елементах системи електропостачання електрифікованої ділянки, тобто за економією електроенергії після впровадження компенсації.

Окрім оптимізації закону керування компенсуючими пристроями, можна визначити оптимальне їх розташування, вважаючи в першому наближенні тягову мережу еквівалентною лінією з питомим опором ρ , площею поперечного перерізу $F(x)$ та розподілом реактивної потужності споживачів $Q(x)$.

Для визначення оптимального розташування компенсуючого пристрою в такій еквівалентній лінії за умови мінімуму втрат потужності споживачів, які підімкнені до даної магістралі, розглянемо втрати потужності в залежності від реактивного навантаження [5] в лінії довжиною L

$$\Delta P = \frac{\rho}{U^2} \int_0^L \frac{Q^2(x)}{F(x)} dx,$$

де ρ - питомий опір лінії, Ом/км; U - живляча напруга, кВ; $Q(x)$ та $F(x)$ - реактивна потужність, квар, і переріз лінії в точці з абсцисою x .

При встановленні БК потужністю Q_K на відстані l від початку лінії втрата потужності становить

$$\Delta P_K = \frac{\rho}{U^2} \left[\int_0^l \frac{(Q(x) - Q_K)^2}{F(x)} dx + \int_0^l \frac{Q^2(x)}{F(x)} dx \right]$$

В результаті компенсації реактивної потужності втрати в магістралі зменшаться на величину

$$\delta P = \Delta P - \Delta P_K = \frac{\rho Q_K}{U^2} \int_0^l \frac{2Q(x) - Q_K}{F(x)} dx.$$

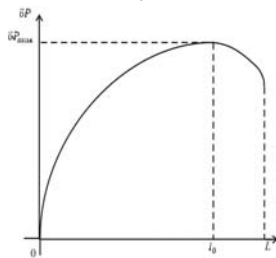


Рис. 3. Визначення оптимального місця розташування КП на ділянці

Знаходячи екстремум функції $\delta P(l)$ за цим рівнянням, визначимо оптимальну точку підмикання БК l_0 , $Q(l_0) = \frac{Q_K}{2}$.

Тобто, батарею конденсаторів необхідно підмикати в точці магістралі, де реактивне навантаження дорівнює половині потужності БК.

Дослідження показують [1], що реалізація заходів з компенсації реактивної потужності може дати відчутний економічний ефект. При встановленні лише одного пристрою групової компенсації можна скоротити втрати електроенергії в мережі близько 20 %.

Висновки

1. Перешкодою до впровадження швидкісного руху на залізницях України може бути забезпечення нормального рівня напруги, резерв у підвищенні якої передбачається в оптимізації режимів компенсації реактивної потужності на ділянках електрифікованих залізниць.

2. Досить зручним методом у пошуку оптимального режиму роботи компенсуючого пристрою є матричний метод аналізу електричних кіл з врахуванням трансформації.

3. Оптимальне розташування пристроїв компенсації реактивної потужності доцільно визначати за цільовою функцією, яка визначає зміну втрат активної потужності після впровадження компенсації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондар, О.І. Оцінка впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в електромережі залізничного вузла [Текст] / О.І.Бондар, І.Л.Бондар // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В.Лазаряна – 2009. – Вип.27 – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С.51-55.

2. Кузнецов, В.Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог [Текст] / В.Г.Кузнецов, Р.С.Мыцко, Д.А.Босый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2006. – Вип.12. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С.38-40.

3. Мельников, Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей [Текст] / Н.А. Мельников. – М. – Л.: Энергия, 1966–216 с.

4. Бородулин, Б.М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б.М.Бородулин, Л.А.Герман., Г.А.Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

5. Жежеленко, И.В. Реактивная мощность в системах электроснабжения: учебное пособие [Текст] / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – К.: УМК ВО, 1989. – 108 с.