

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ВУЗЛА

В роботі запропоновано узагальнену математичну модель електричної мережі залізничного вузла електрифікованої залізниці. На основі цієї моделі виконано оцінку впливу встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії у мережі.

В работе предложена обобщенная математическая модель электрической сети железнодорожного узла электрифицированной железной дороги. На основе данной модели выполнено оценку влияния установки устройств компенсации реактивной мощности на потери электроэнергии в сети.

In this work the generalized mathematical model of an electrical network of the electrified railway junction is proposed. An estimation of influence of static var compensators installation on electric power losses in a network is executed on the basis of given model.

Відомо, що Україна відноситься до енергодефіцитних країн, яка задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку лише частково. Тому проблема енергозбереження є на сьогодні однією з найактуальніших проблем розвитку економіки нашої держави. Ще у 1996 р. уряд України затвердив Комплексну державну програму енергозбереження України [1], яка передбачає вихід вітчизняних підприємств сфери матеріального виробництва та послуг в перспективі на рівень передових держав з ринковою економікою щодо енергоємності.

Невід'ємною складовою частиною в досягненні цієї мети є зменшення втрат електроенергії на залізничному транспорті. Такі втрати умовно можна розподілити на ті, що безпосередньо пов'язані з технологічним процесом, та додаткові, які зумовлені другорядними факторами, зокрема перетоками реактивної потужності в електричних мережах залізниць. Ефективними технічними засобами зменшення таких перетоків є пристрої компенсації реактивної потужності, встановлення яких паралельно споживачу в місці його розташування дозволяє замінити шлях циркуляції реактивної потужності з контуру «джерело електроенергії – споживач» на контур «компенсуючий пристрій – споживач», розвантаживши при цьому живлячу електричну мережу. Додаткові позитивні наслідки такого технічного рішення також відомі, основними з них є покращення режиму напруги в електричній мережі та отримання можливостей додаткового підключення нових споживачів без заміни живлячої лінії.

Одночасно слід зазначити, що проблема впровадження засобів компенсації реактивної потужності в електромережах залізничного транспорту є комплексною і має ряд аспектів.

Передусім тягові підстанції залізничного транспорту призначені для забезпечення електропостачання як тягових, так і нетягових споживачів. Така ситуація є характерною для електрифікованих залізниць саме країн колишнього СРСР. В той же час, як зазначено [2], на залізницях світу подібна практика застосовується вкрай рідко, і як правило електрифіковані залізниці мають автономну зовнішню систему електропостачання. В той же час, як свідчать опубліковані дані [3], з переробленої підстанціями залізниць України електроенергії на тягу використано 58 %, а решта пішла на потреби різного роду нетягових споживачів або була транзитована і передана стороннім організаціям. Відповідно потрібно розрізнити питання компенсації реактивної потужності тягових та нетягових споживачів.

Особливістю тягового навантаження є його різка зміна у часі. Тобто реактивна потужність компенсуючого пристрою має постійно змінюватись відповідним чином з метою уникнення режимів перекомпенсації. Цей пристрій має бути встановлений на тяговій підстанції у РУ-27,5 кВ при системі тяги змінного струму, або ж РУ-10 (6) кВ при системі тяги постійного струму [4]. Попри існування подібних пристроїв централізованої компенсації на залізницях України, слід зазначити, що проблема плавного регулювання реактивної потужності у них не реалізована через відсутність вітчизняної еле-

ментної бази для силових безконтактних регуляторів. Крім того, наявність в системі тягового електропостачання вищих гармонік напруг і струмів суттєво знижує надійність роботи зазначених пристроїв.

Варто додати, що наявність центральної компенсації підвищує коефіцієнт потужності системи електропостачання залізниці в цілому, що позитивно впливає на режим у системі зовнішнього електропостачання, проте не зменшує втрати електроенергії в розподільчих мережах залізничних районів електричних мереж. Між тим, довжина цих мереж складає близько 8,8 тис. км високовольтних та 13 тис. км низьковольтних мереж [3]. Від цих мереж отримують живлення нетягові споживачі з різним коефіцієнтом потужності та режимом роботи, такі, наприклад, як освітлювальні пристрої, асинхронні та синхронні двигуни, індукційні печі, зварювальні прилади та ін. В цілому ці споживачі можуть бути охарактеризовані як активно-індуктивні навантаження, швидкість зміни у часі яких суттєво нижча, ніж у тягового навантаження. Компенсуючі пристрої можуть бути встановлені як для одиничних навантажень, так і для окремої групи (групова компенсація). Тобто постає задача вибору найефективнішого варіанту їх кількості, розташування і співвідношення потужностей окремих пристроїв. На нашу думку, головним критерієм ефективності заходів з компенсації реактивної потужності має бути досягнення максимального річного економічного ефекту від її впровадження. В основі досягнення такого ефекту лежить зменшення втрат електроенергії в розподільчій мережі. Але в залежності від особливостей конкретної електромережі можуть бути враховані й додаткові критерії, наприклад, необхідність покращення режиму напруги на віддаленому споживачеві або розвантаження окремої лінії від реактивного струму з метою створення можливості приєднання нових споживачів без її заміни, тощо.

Таким чином, в задачі вибору компенсуючих пристроїв для залізничного району електричних мереж можна виділити такі основні етапи.

1. Розробка математичної моделі району електромереж і визначення на її основі рівнів напруги та втрат електроенергії при різних конфігураціях і потужностях компенсуючих пристроїв.

2. Визначення необхідної потужності, типів обладнання та доцільних місць розташування

таких пристроїв за обраними критеріями ефективності.

3. Визначення режимів роботи компенсуючих пристроїв, меж та алгоритмів регулювання їх реактивної потужності.

Аналіз останніх публікацій із зазначеної тематики свідчить, що значна частина цих питань лишається поза увагою дослідників. Так, наприклад, у роботі [5] на основі матричного методу розрахунку та ймовірнісного графіку руху поїздів розроблена математична модель ділянки тягової мережі електрифікованої залізниці і виконано оцінку втрат електроенергії на цій ділянці, проте мережі нетягових споживачів, що живляться від тієї ж підстанції, що і тягова мережа, при цьому не розглядалися. Питанням компенсації реактивної потужності на виробничих об'єктах залізничного транспорту присвячено також роботу [6]. В якості компенсуючих пристроїв автор пропонує використання синхронних двигунів в режимі компенсаторів з неперервним керуванням реактивної потужності. Зауважимо, що технічні можливості реалізації такого варіанту в більшості випадків обмежені відсутністю достатньої кількості синхронних двигунів у складі нетягових споживачів.

Отже, метою цієї роботи є розробка узагальненої математичної моделі складно-замкненої системи електропостачання нетягових споживачів електрифікованої залізниці і здійснення на її основі оцінки впливу встановлення технічних засобів компенсації реактивної потужності на втрати електричної енергії в зазначеній електромережі.

Враховуючи розгалужену структуру таких мереж і велику кількість приєднань, при побудові моделі, на нашу думку, найбільш доцільно використання матричного методу аналізу електричних кіл [7]. При цьому, виходячи із специфіки задачі, перевагу при її розв'язанні слід надати адаптованому методу вузлових напруг у матричній формі, оскільки така модель дозволяє легко визначити напруги на всіх споживачах. Таким чином, загальна модель мережі має наступний вигляд;

$$[Y][U_A] = [J], \quad (1)$$

де $[Y]$ – матриця вузлових провідностей,

$[U_A]$ – вектор спаду напруги від кожного незалежного вузла до базисного;

$[J]$ – вектор задаючих струмів.

Матрицю вузлових провідностей отримаємо наступним чином. Склавши діагональну матрицю опорів віток (за відомими опорами ліній),

визначаємо діагональну матрицю провідностей як

$$[Y_B] = [Z_B]^{-1}. \quad (2)$$

Подальший перехід до матриці вузлових провідностей виконуємо за формулою

$$[Y] = [M][Y_B][M]_T, \quad (3)$$

де $[M]$ – перша матриця інцидентій (з'єднань у вузлах),

$[M]_T$ – транспонована матриця $[M]$.

Наведемо далі загальний алгоритм оцінки втрат електроенергії на основі математичної моделі (1) – (3).

Спочатку складаємо граф схеми електромережі. Для цього оберемо балансуючий вузол. У разі наявності одного джерела живлення, в якості балансуючого вузла доцільно прийняти шини тягової підстанції, а у разі наявності декількох джерел – джерело живлення, потужність якого найбільша. Також пронумеруємо вітки і вузли крім балансуючого і задамо позитивний напрямок віткам графа схеми.

Після цього складаємо першу матрицю інцидентій $[M]$.

Далі складаємо матрицю комплексних опорів віток $[Z_B]$.

Визначимо матрицю вузлових провідностей як

$$[Y] = [M][Y_B][M]_T. \quad (4)$$

Визначимо також матрицю вузлових опорів

$$[Z_B] = [Y_B]^{-1}. \quad (5)$$

За відомими навантаженнями споживачів складаємо вектор задаючих струмів $[J]$.

Вектор спаду напруги від кожного з незалежних вузлів схеми до базисного знайдемо як

$$[U_\Delta] = [Z_B][J]. \quad (6)$$

Тоді спади напруг і струми у лініях можна знайти як

$$[U_B] = [M]_T[U_\Delta]; \quad (7)$$

$$[I] = [Y_B][M]_T[U_\Delta]. \quad (8)$$

Втрати потужності у кожній лінії та в усій мережі відповідно знайдемо за виразами (9) та (10).

$$\Delta P_i = R_i \cdot I_i^2; \quad (9)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (10)$$

де n – кількість ліній електромережі.

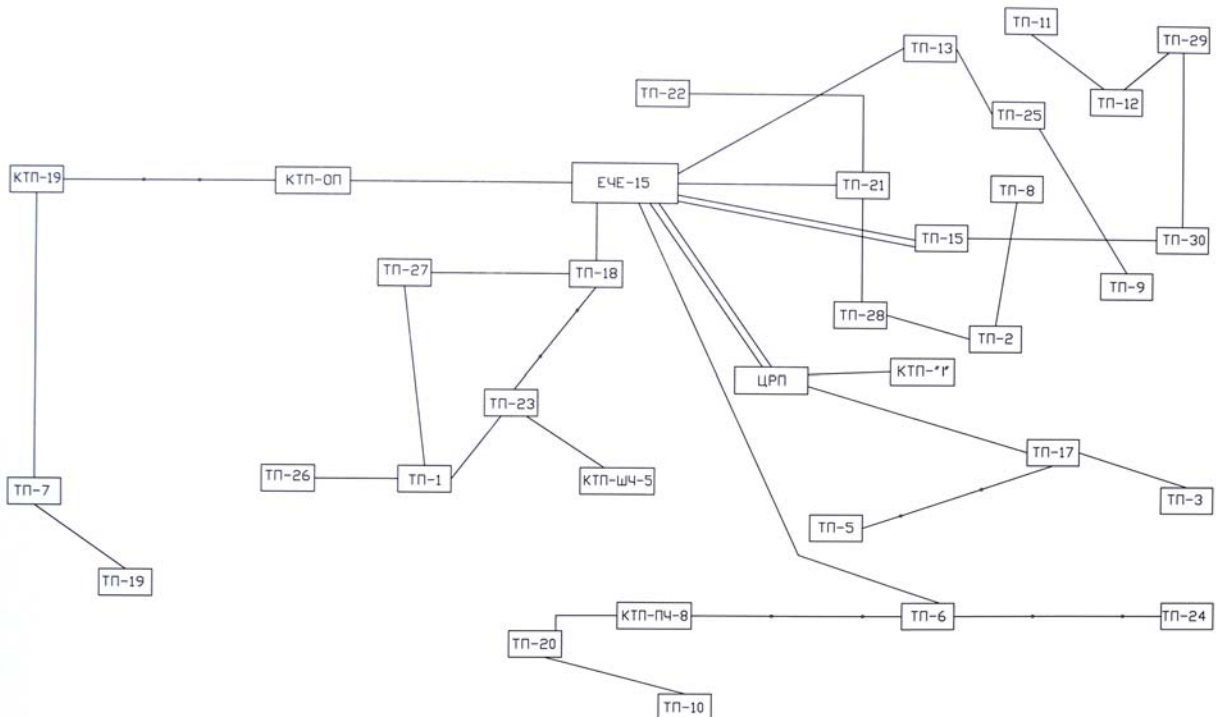


Рис. 1. Схема району електричних мереж залізничного вузла

Як приклад, покажемо результати застосування цього алгоритму для оцінки можливих втрат електроенергії в електричних мережах залізничної станції Нижньодніпровськ-Вузол у разі застосування на частині споживачів пристроїв компенсації реактивної потужності та перспективі реконструкції електромережі вузла з використанням номінальної живлячої напруги 10 кВ.

Існуючу схему електромережі вузла представлено на рис. 1.

Як бачимо з рис. 1, через 42 повітряні та кабельні лінії, що утворюють складно-замкнену систему електропостачання, отримують живлення від тягової підстанції ЕЧЕ-15 та лінії міської мережі загальною 33 трансформаторні підстанції. Граф, що відповідає цій схемі, представлено на рис. 2.

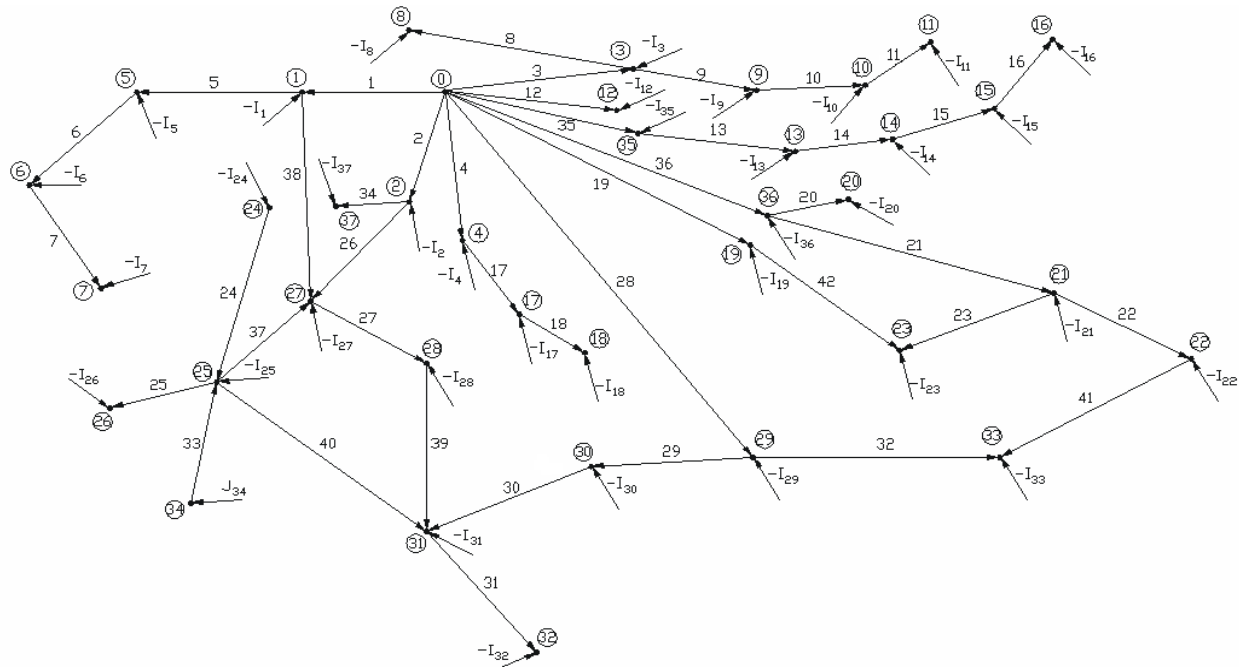


Рис. 2. Граф схеми району електричних мереж залізничного вузла рис. 1

Результати розрахунків, що виконані за формулами (4) – (10) за відомими потужностями навантажень і опорамі ліній, показують, що річні втрати електроенергії в розподільчій мережі за відсутності пристроїв компенсації реактивної потужності при заданих умовах складають $7,308 \cdot 10^5$ кВт·год. (рис. 3).

На основі аналізу характеру роботи споживачів серед них встановлені такі їх групи, що мають найнижчий середній коефіцієнт потужності (близько 0,78). Після цього методом перебору варіантів встановлено, що у разі застосування лише одного пристрою групової компенсації реактивної потужності найбільш доцільно встановити його на ТП-20 (рис. 1). В якості такого пристрою пропонується застосувати батарею конденсаторів, встановлена потужність якої становить 3000 квар, що дозволить підняти коефіцієнт потужності групи споживачів, приєднаних до ТП-20, ТП-10 та КТП-ПЧ-8 до 0,97. В цьому випадку за рахунок зменшення перетоків реактивної потужності, а отже і струмів, річні втрати електричної енергії

в лініях електромережі зменшуються і складають $6,166 \cdot 10^5$ кВт·год.

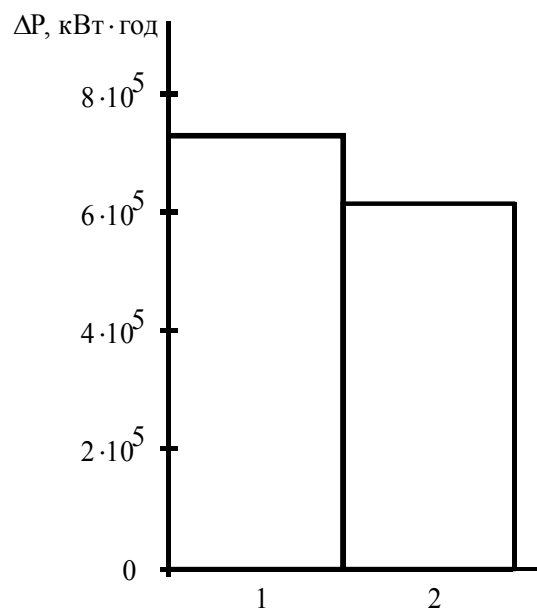


Рис. 3. Гістограма річних втрат електричної енергії в мережі залізничного вузла:

1 – за відсутності компенсуючого пристрою;
2 – за наявності компенсуючого пристрою

Проведені у роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Питання компенсації реактивної потужності в електромережах залізничного транспорту потребує комплексного підходу, що полягає у необхідності аналізу режимів роботи не лише частини системи, котра забезпечує електротягу, але й електромережі нетягових споживачів, в якій у зв'язку з перетоками реактивної потужності також мають місце значні втрати електроенергії, а отже, є необхідність у встановленні пристроїв одиничної або групової компенсації реактивної потужності.

2. Зазначений аналіз режимів роботи електромереж нетягових споживачів може бути здійснений шляхом математичного моделювання на основі матричного методу розрахунку електричних кіл. Зокрема, за допомогою такої моделі можливо отримати значення втрат електроенергії при різних варіантах розташування компенсуючих пристроїв, а також значення напруг на споживачах.

3. Реалізація заходів з компенсації реактивної потужності в електромережах нетягових споживачів може дати відчутний економічний ефект. Так, наприклад, як видно з рис. 3, за рахунок встановлення лише одного пристрою групової компенсації можна скоротити втрати електроенергії в мережі майже на 19,5 %.

Наприкінці виділимо перспективні напрями подальших досліджень у розглянутому питанні. По-перше, потрібна розробка загальної методики визначення оптимальної кількості, місць розташування та потужності компенсуючих пристроїв у електромережі. По-друге, потребує вдосконалення математична модель мережі з точки зору необхідності врахування одночасно, як тягових, так і нетягових навантажень і, відповідно, відпрацювання комплексних рішень щодо компенсації їх реактивних потужностей.

Потребують також додаткового обґрунтування і критерії ефективності заходів з компенсації реактивної потужності. І, нарешті, актуа-

льною лишається задача визначення необхідних меж регулювання реактивної потужності компенсуючих пристроїв залежно від зміни навантаження споживача.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Комплексна державна програма енергозбереження України [Електрон. ресурс] / Держкоменергозбереження – К., 1996. – Режим доступу: <http://www.naer.gov.ua/docs/1060.zip>
2. Котельников, В. В. Электрификация железных дорог: мировые тенденции и перспективы [Текст]: / В. В. Котельников. – М.: Транспорт, 2002. – 210 с.
3. Карпенко, С. Я. Опыт работы Укрзалізнички по модернизации коммерческого учета электроэнергии. Стимулирование потребителей на оптовом рынке электроэнергии к модернизации учета и регулирования собственного графика потребления [Текст] / С. Я. Карпенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 28-32.
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. 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.
6. Зубко, А. П. Адаптивна система як інструмент покращення якісних показників живлячої мережі електрозабезпечення виробничих об'єктів залізничного транспорту [Текст] / А. П. Зубко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 26-27.
7. Мельников, Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей [Текст]: / Н. А. Мельников. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 216 с.

Надійшла до редколегії 26.03.2009.