

РОЗДІЛ 1. КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЕФЕКТУ ФЕРАНТІ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖАХ

Рибась Л. Ф., магістрант, Марченко А. А., к.т.н., доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. У сучасних високовольтних електричних мережах стабільне регулювання напруги є ключовим фактором надійного електропостачання. Одним із викликів є уникнення перенапруг, викликаних природними явищами, такими як ефект Феранті. Цей ефект стає помітним на довгих лініях електропередач, де наявність ємнісної складової призводить до підвищення напруги на кінці лінії порівняно з її початком. Розуміння механізмів виникнення ефекту Феранті та ефективне застосування засобів його контролю стає важливим завданням у сучасному диспетчерському управлінні енергосистемами.

З практичного досвіду відомо, що при підключенні на холостий хід більшості ЛЕП 330 кВ довжиною до 200 км спостерігається зростання напруги на шинній системі підстанцій приблизно на 2 %. Втім, це стосується лише стандартних умов роботи електромережі. При підключенні ЛЕП на ХХ у ремонтних або аварійних режимах результати можуть бути іншими, оскільки напруга залежить не лише від довжини лінії та конструкції опор, а й від додаткових факторів.

У даній публікації розглядається проблема регулювання напруги в високовольтних електричних мережах, особливо на довгих лініях електропередач, де вираженою є проблема зростання напруги внаслідок ефекту Феранті. Описуються основні характеристики зарядного струму, природа ефекту Феранті, а також ефективні методи регулювання напруги та компенсації даного ефекту за допомогою компенсаційного обладнання. Особлива увага приділяється ролі диспетчерського управління у забезпеченні стабільності напруги та запобіганню аварійним ситуаціям, які можуть виникати внаслідок небажаного зростання напруги.

Мета роботи. Зрозуміти механізми виникнення ефекту Феранті та показати ефективні засоби його контролю.

Матеріали та результати досліджень.

Зарядна потужність лінії – це параметр, що визначає кількість реактивної потужності, яку передає високовольтна лінія електропередачі навіть без підключеного навантаження. Іншими словами, це кількість енергії, яка зберігається в електричному полі лінії через її власну ємність, оскільки повітря і матеріали, з яких виготовлена лінія, також мають певну електричну ємність.

Зарядна потужність ЛЕП визначається за формулою:

$$Q_c = \frac{1}{2} U^2 b_0$$

де U – робоча напруга ЛЕП;
 b_0 – ємнісна провідність ЛЕП.

Ця реактивна потужність, створена зарядною потужністю, є важливою, оскільки вона може впливати на стійкість системи, рівень напруги на лінії та потребу в додаткових заходах для компенсації реактивної потужності. Тому зарядна потужність є одним із ключових факторів в електроенергетиці, особливо для довгих повітряних ліній високої напруги.

Розглянемо принцип дії ефекту Феранті на п-подібній схемі заміщення ЛЕП. Також ми можемо практично довести від чого залежить різниця напруги на приймальному кінці та холостому кінці під час включення лінії на холостий хід.

Схема П-моделі складається з:

1. Двох шунтуючих ємностей, розташованих по кінцях лінії, що представляють ємність лінії.
2. Індуктивності і опору, розміщених послідовно, для моделювання індуктивного і резистивного впливу на всій протяжності лінії.

Ця модель допомагає візуалізувати і розрахувати вплив ємності та індуктивності, що проявляється у вигляді ефекту Феранті, коли напруга на приймальному кінці може бути вищою за напругу на передавальному кінці при відсутності навантаження.

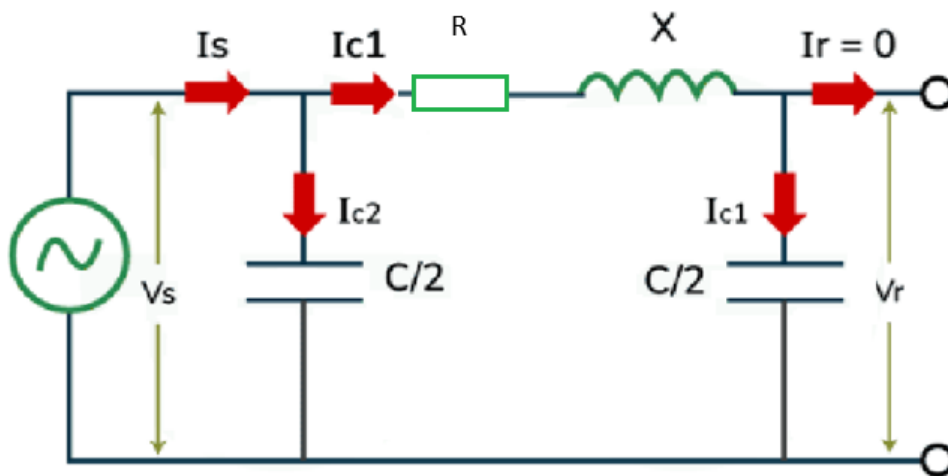


Рисунок 1 – П-подібна схема заміщення ЛЕП

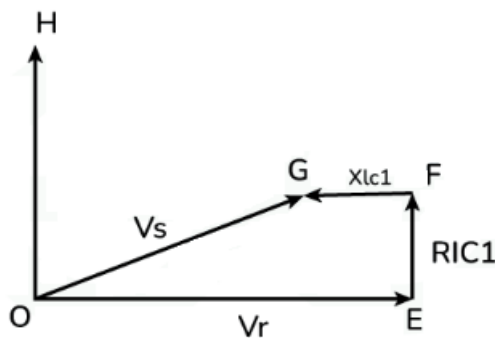


Рисунок 2 – Векторна діаграма ефекту Феранті

Ефект Ферранті в довгій лінії передачі електроенергії характеризується наступними векторами на діаграмі:

- **OE** – це приймальна напруга на кінці лінії.
- **OH** – вектор, що вказує на струм у ємності на приймальному кінці.
- **FE** – позначає падіння напруги на опорі R.
- **FG** – вказує на падіння напруги на індуктивності X.
- **OG** – представляє передавальну напругу в умовах відсутності навантаження.

Розглянемо математичне обґрунтування ефекту Ферранті для довгої лінії передачі електроенергії, де напруга на приймальному кінці V_r може виявитися вищою за передавальну напругу V_s при відсутності навантаження. Формули для довгих ліній допомагають описати залежність між передавальною та приймальною напругами, а також визначають вплив довжини лінії, індуктивності й ємності на цей ефект.

Формули для передавальної і приймальної напруги

В умовах відсутності навантаження, $I_r = 0$. Вихідна формула для передавальної напруги:

$$U_s = (1 + \frac{ZY}{2})U_r + Z I_r$$

Підставляючи $I_r = 0$:

$$U_s = (1 + \frac{ZY}{2})U_r$$

Отже, різниця між передавальною та приймальною напругами:

$$U_s - U_r = (\frac{ZY}{2})U_r$$

Визначення параметрів Z і Y

Для довгої лінії Z та Y визначаються як:

- $Z = (r + j\omega L)S$, де r – опір на одиницю довжини, L – індуктивність на одиницю довжини, $\omega = 2\pi f$;
- $Y = (j\omega C)S$, де C – ємність на одиницю довжини, а S – довжина лінії.

При нехтуванні опором ($r \approx 0$), ми отримаємо:

$$U_s - U_r = -\frac{1}{2}\omega^2 S^2 L C U_r$$

Для того щоб спростити ще більше це рівняння підставимо формулу швидкості електромагнітної хвилі, яка визначається як $\frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 * 10^8 \frac{M}{c}$

$$LC = \frac{1}{(3 * 10^8)^2}$$

Тоді остаточне рівняння для характеризування ефекту Феранті:

$$U_s - U_r = -\left(\frac{4\pi^2}{18} * 10^{-16}\right) f^2 S^2 U_r$$

Тобто можемо зробити певні висновки з аналізу цього рівняння, різниця напруг на приймальному та холостому кінці має *від'ємне значення*. Також ефект Феранті (зміна напруги на приймальному кінці) тим більша чим більша частота мережі та довжина лінії.

Запобігання ефекту Феранті

Оскільки ефект Феранті не враховують при проектуванні та розрахунку ліній середнього та низького класу напруг, в основному компенсують довгі лінії високої напруги (750 кВ). Для компенсації ліній класом напруги 750 кВ використовують шунтуючі реактори.

Шунтуючі реактори – це індуктивні котушки, розроблені для роботи з високими напругами, які, на відміну від конденсаторних батарей, поглинають реактивну потужність з мережі. Вони також виконують компенсаційну функцію, оскільки використовуються для нейтралізації зарядної потужності високовольтних ліній електропередач. Шунтуючі реактори можуть бути розраховані на діапазон напруг від 3,5 до 750 кВ і підключатися як безпосередньо до ЛЕП, так і на шини підстанцій.

Реактивна потужність яку споживає шунтуючий реактор розраховують за формулою:

$$Q_{\text{шр}} = \frac{U^2}{\omega L}$$

де L – індуктивність фази реактора

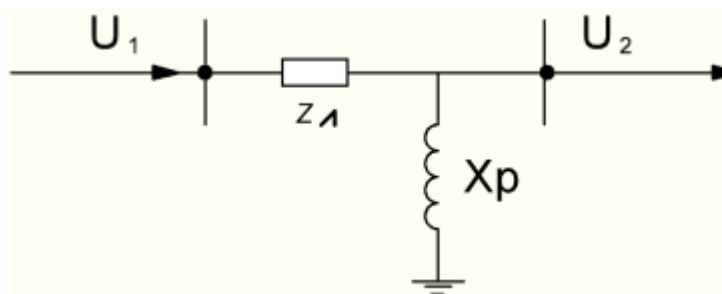


Рисунок 3 – Схема заміщення шунтуючого реактору

Для управління режимами напруги та реактивної потужності, поряд із традиційним застосуванням генераторів, синхронних і статичних компенсаторів, комутованих реакторів та конденсаторних батарей, у останнє десятиліття широко впроваджуються керовані шунтуючі реактори (КШР). Виконання КШР у трансформаторному варіанті, з можливістю плавного регулювання споживаної реактивної потужності, дозволяє використовувати їх на відкритих установках будь-якого класу напруги. Це забезпечує розширену гнучкість у виборі місця розташування в енергосистемі, сприяє стабілізації напруги, оптимізації потоків

реактивної потужності, збільшенню пропускної здатності ЛЕП, зниженню втрат електроенергії, а також зменшенню частоти комутаційних операцій та кількості дій регуляторів трансформаторів з РПН.

Переваги і недоліки ефекту Феранті

Переваги:

- *Зниження втрат напруги:* При певних умовах ефект Феранті частково компенсує втрати напруги на лінії, знижуючи необхідність додаткового обладнання для компенсації.

- *Економія на компенсуючих пристроях:* У мережах з малими навантаженнями можна зменшити використання обладнання для регулювання напруги.

Недоліки:

- *Ризик перенапруги:* Підвищена напруга на кінці лінії при низьких навантаженнях може перевищувати допустимі рівні, що призводить до перенапруг і пошкодження обладнання.

- *Необхідність регулювання напруги:* Для зменшення негативного впливу цього ефекту потрібне додаткове обладнання (шунтуючі реактори, регульовані трансформатори), що підвищує витрати на обслуговування.

- *Складність диспетчерського управління:* Ефект ускладнює контроль за напругою на довгих ділянках, особливо при змінному навантаженні, вимагаючи активного моніторингу та керування.

Висновки. Ефект Феранті, що супроводжує роботу довгих високовольтних ліній електропередач, є важливим явищем, яке потребує ретельного контролю в умовах сучасної електроенергетичної системи. Підвищення напруги на кінцях ліній за малих навантажень може позитивно впливати на компенсацію втрат, однак водночас створює ризики перенапруг, здатних пошкодити обладнання та знизити стабільність мережі. Ефективне регулювання напруги, що включає застосування шунтуючих реакторів, трансформаторів з регулюванням під навантаженням та інших компенсаційних засобів, є критично важливим для управління наслідками ефекту Феранті.

У цьому контексті диспетчерське управління стає невід'ємною складовою, що забезпечує постійний моніторинг напруги та оперативне втручання для стабілізації режимів роботи мережі. Залучення автоматизованих систем диспетчерського управління дозволяє підтримувати оптимальні параметри напруги, знижуючи ризики та підвищуючи надійність мережі в реальних умовах експлуатації.

Перелік посилань

1. Вілсон Дж. Ф. Ферранті та британська електротехнічна промисловість, 1864–1930 / Дж. Ф. Вілсон. – Манчестер: Manchester UniUersity Press, 1988. – 274 с.

2. Сьолвер К.-Е., Мораїс С. А. Переривання струму лінії зарядки ВН та НВН автоматичними вимикачами [Електронний ресурс] / К.-Е. Сьолвер, С. А. Мораїс. – Архівовано 26 січня 2007 р.

3. Ібрагім А. І., Доммель Х. В. База знань для перехідних процесів комутації [Електронний ресурс] / А. І. Ібрагім, Х. В. Доммель. – Архівовано 12 травня 2006 р.