https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-36
УДК 621.311.1.001.57

КУЧАНСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
https://orcid.org/0000-0001-6473-9478
e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com
КОШМАН ВСЕВОЛОД
https://orcid.org/0000-0001-6473-9478
e-mail: skilldur@ukr.net
Інститут електродинаміки Національної академії наук України,
ШЕВЧУК ВІТАЛІЙ
https://orcid.org/0000-0003-0535-2630
vshevchuk1603@gmail.com
Інститут електродинаміки Національної академії наук України,
САБАРНО ЛЮДМИЛА
https://orcid.org/0000-0002-2153-2183
e-mail: sabarno@ukr.net

СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО КОМПЕНСУВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Викладено основні вимоги до компенсування реактивної потужності в системах електропередавання змінного струму надвисокої напруги. Наведено блок-схема планування компенсування реактивної потужності керованими шунтувальними реакторами та статичними синхронними компенсаторами. Стандартизація систем передачі змінного струму надвисокої напруги на базі Міжнародної електротехнічної комісії наразі йде повним ходом. У 2013 році МЕК заснував технічний комітет ТК 122, який готує релевантні стандарти для систем із робочою напругою понад 800 кВ. Фахівці МЕК/ТК 122 готують та поширюють специфікації системного рівня, що використовуються для проектування, будівництва та експлуатації платформ СВН. У той самий час вони публікують стандарти для конкретного устаткування. Співпраця з CIGRE У сфері стандартизації інженерних рішень, що розглядаються, МЕК тісно співпрацює з Міжнародною радою з великих електричних систем високої напруги (Conseil international des grands réseaux électriques; CIGRE). Ця членська організація з глобальним охопленням розробляє та публікує актуальні технічні документи в галузі енергосистем, ділячись знаннями та досвідом із зацікавленими сторонами. МЕК та організація CIGRE розпочали співпрацю у галузі стандартизації систем електропередачі надвисокої напруги після спільного міжнародного симпозіуму з платформ СВН, який у 2007 році відбувся у Пекіні (Китай). Робоча програма МЕК/ТК 122 За словами представників МЕК/ТК 122, інтеграція технічних знань усіх заінтересованих сторін є ключем до розробки збалансованих міжнародних стандартів. З 2014 року МЕК/ТК 122 опублікував три технічні специфікації та один технічний звіт. Технічний звіт МЕК ТО 63042-100:2016 "Системи передачі змінного струму надвисокої напруги - Частина 100: Загальна інформація" містить огляд керівних принципів та стандартів для систем передачі змінного струму надвисокої напруги, підготовлених з метою забезпечення надійності та доступності таких рішень з урахуванням екологічних аспектів. їх будівництва та експлуатації. Опубліковані технічні специфікації містять інформацію про вимоги до систем передачі змінного струму надвисокої напруги, що стосуються регулювання напруги та конструкції ізоляції, конструкції підстанцій та приймальних випробувань. Мова йде про наступні документи: • МЕК ТС 63042-101:2019 "Системи передачі змінного струму надвисокої напруги - Частина 101: Проектування ізоляції та систем регулювання напруги"; • МЕК ТС 63042-201:2018 "Системи передачі змінного струму надвисокої напруги - Частина 201: Проектування підстанцій для передачі змінного струму надвисокої напруги"; • МЕК ТС 63042-301:2018 "Системи передачі змінного струму надвисокої напруги - Частина 301: Приймальні випробування на місці"; В даний час робота фахівців технічного комітету МЕК/ТК 122 охоплює наступні сфери: загальні питання проектування систем, проектування ліній електропередачі, введення в експлуатацію та керівні вказівки щодо вимірювання частотних параметрів ліній електропередачі змінного струму НВН.

Ключові слова: *компенсування реактивної потужності, керований шунтувальний реактор, міжнародна електротехнічна комісія, системи змінного струму надвисокої напруги.*

KUCHANSKY VLADYSLAV, KOSHMAN VSEVOLOD,
SHEVCHUK VITALIY, SABARNO LYUDMILA
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

MODERN REQUIREMENTS FOR REACTIVE POWER COMPENSATION IN MAIN ELECTRICAL NETWORKS

The main requirements for reactive power compensation in extra-high voltage AC power transmission systems are outlined. A flowchart for planning reactive power compensation using controlled shunt reactors and static synchronous compensators is presented. Standardization of extra-high voltage AC power transmission systems on the basis of the International Electrotechnical Commission is currently in full swing. In 2013, IEC established a technical committee, TC 122, which prepares relevant standards for systems with operating voltages above 800 kV. IEC/TC 122 specialists prepare and disseminate system-level specifications used for the design, construction and operation of EHV platforms. At the same time, they publish standards for specific equipment. Cooperation with CIGRE In the field of standardization of engineering solutions under consideration, IEC closely cooperates with the International Council for Large High Voltage Electrical Systems (Conseil international des grands réseaux électriques; CIGRE). This global membership organization develops and publishes relevant technical documents in the field of power systems, sharing knowledge and experience with stakeholders. IEC and CIGRE began their collaboration on the standardization of extra-high voltage transmission systems after a joint

international symposium on EHV platforms held in Beijing, China, in 2007. IEC/TC 122 work programme According to IEC/TC 122 representatives, the integration of technical expertise from all stakeholders is key to the development of balanced international standards. Since 2014, IEC/TC 122 has published three technical specifications and one technical report. Technical report IEC TS 63042-100:2016 "Extra-high voltage AC transmission systems - Part 100: General information" provides an overview of the guidelines and standards for extra-high voltage AC transmission systems prepared to ensure the reliability and availability of such solutions, taking into account environmental aspects. their construction and operation. Published technical specifications contain information on the requirements for extra-high voltage AC transmission systems relating to voltage regulation and insulation design, substation design and acceptance tests. These are the following documents: • IEC TS 63042-101:2019 "Extra-high voltage AC transmission systems - Part 101: Design of insulation and voltage regulation systems"; • IEC TS 63042-201:2018 "Extra-high voltage AC transmission systems - Part 201: Design of substations for extra-high voltage AC transmission"; • IEC TS 63042-301:2018 "Extra-high voltage AC transmission systems - Part 301: On-site acceptance tests"; Currently, the work of the experts of the IEC/TC 122 technical committee covers the following areas: general issues of system design, transmission line design, commissioning and guidelines for measuring frequency parameters of EHV AC transmission lines.

Keywords: *reactive power compensation, controlled shunt reactor, international electrotechnical commission, extra-high voltage AC systems*

Стаття надійшла до редакції / Received 20.08.2025
Прийнята до друку / Accepted 11.09.2025

Постановка задачі

Стаття присвячена розробці та дослідженню системи автоматизованого керування засобами компенсації реактивної потужності. В даний час у зв'язку зі значним зниженням активного навантаження і незважаючи на відносну стабілізацію електроспоживання за останні 2-3 роки, системоутворюючі лінії електропередачі можуть бути завантажені активною потужністю, значно меншою за натуральну. Надлишок генерованої при цьому реактивної потужності може призвести до неприпустимого підвищення напруги, особливо в мережах надвисокої напруги. У зв'язку з цим, для ЕС України актуальною є проблема введення режиму в допустиму область напруги з використанням усіх доступних оперативних засобів управління режимом напруги та реактивної потужності.

Аналіз останніх джерел

Впровадження в експлуатаційну практику електроенергетичних систем (ЕЕС) України новітніх підстанційних засобів компенсації реактивної потужності (ЗКРП) — зокрема, керованих шунтувальних реакторів, статичних тиристорних компенсаторів, пристроїв типу статичного синхронного компенсатора (СТАТКОМ), асинхронізованих синхронних компенсаторів тощо — зумовлює появу широкого спектра завдань, які постають перед оперативним персоналом вузлових підстанцій. Найважливішими серед них є узгоджене управління зазначеними засобами з метою стабілізації рівня напруги, мінімізації втрат електроенергії та забезпечення належної якості електропостачання [1-5].

Особливої складності набуває координація дій ЗКРП у випадках змін у режимах роботи або конфігурації обладнання на електрично пов’язаних об’єктах мережі, адже це суттєво впливає на ефективність функціонування компенсаційних засобів і рівень напруги в контрольованих вузлах. Сьогодні існують кілька типів експериментальних систем автоматичного регулювання напруги та реактивної потужності для підстанцій класу надвисокої напруги. До них належать як традиційні системи з детермінованими алгоритмами, розробленими під конкретні об’єкти, так і універсальні багатозв’язкові моделі керування, зокрема на основі нечіткої логіки [5-8].

Водночас, більшість існуючих рішень не враховують динамічних змін у роботі суміжних енергетичних об’єктів, що може призвести до порушення координації при виконанні команд диспетчерського управління і, як наслідок, до неприпустимих відхилень напруги у критичних точках мережі. Крім того, ці системи не реалізують принцип оптимального вибору складу ЗКРП, які доцільно задіювати у процесі регулювання, що обмежує їхню здатність знижувати втрати електроенергії та підвищувати її якість [9-10].

Формулювання цілей статті

Метою є забезпечення стабільного рівня напруги на шинах підстанції з одночасним зменшенням втрат та покращенням якості електроенергії з урахуванням змін у режимах роботи та конфігурації електрично пов’язаних елементів мережі.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення завдання введення режиму в допустиму область в даний час використовується ряд режимних заходів, таких як управління режимом роботи генераторів і синхронних компенсаторів по реактивній потужності, виведення в резерв ненавантажених ліній електропередачі, зміна коефіцієнтів трансформації трансформаторів (автотрансформаторів), відключення батарей статичних конденсаторів у споживачів у періоди підвищених напруг, максимальне використання шунтувальних реакторів, що знаходяться в експлуатації, і т.д. Очевидно, що при реалізації всіх перерахованих режимних заходів слід забезпечити їх максимальну ефективність, що обумовлює необхідність пошуку такого рішення, яке дозволить при мінімальних керуючих впливах дозволити отримати найбільший ефект з точки зору зниження напруги [10-16].

Системи НВН дозволяють передавати електроенергію на великі відстані з мінімальними втратами за допомогою змінного або постійного струму. Створювати такі системи допомагають релевантні добровільні стандарти, засновані на консенсусі, від Міжнародної електротехнічної комісії (International Electrical Commission; IEC; МЕК). Оскільки попит на електроенергію у всьому світі збільшується, лініям електропередачі потрібно забезпечувати більш високу пропускну здатність. Використання відновлюваних джерел енергії в регіонах, розташованих на великій відстані від міст (включаючи морські вітряні електростанції вдалині від узбережжя або сонячні ферми в пустелях), також створює необхідність у локальних енергосистемах з високою пропускною здатністю, що охоплюють великі відстані. З цих причин потреба в системах електропередання надвисокої напруги в майбутньому лише зростатиме. Стандартизація систем передачі змінного струму надвисокої напруги на базі Міжнародної електротехнічної комісії наразі імплантується у всьому світі [1-4].

У системах змінного струму НВН потрібно запланувати та встановити відповідну кількість джерел реактивної потужності, щоб задовольнити вимоги регулювання напруги в системі та зменшити значення небажаного передавання реактивної потужності між різними вузлами мережі/рівнями напруги.

Потрібно підтримувати достатній обсяг постачання реактивної потужності з наявним резервом, охоплюючи достатній обсяг резерву реактивної потужності. Потужність, тип і розташування компенсаторів реактивної потужності потрібно вибирати, щоб покращити можливості передавання електроенергії та розширення меж стійкості системи. Проектування та конструювання компенсаторів реактивної потужності має відповідати вимогам щодо обмеження значень величини перенапруг для систем змінного струму НВН. Коефіцієнт компенсації в межах від 90 % до 110 % вважають прийнятним під час планування реактивного компенсування щоб мінімізувати обмін реактивною потужністю між НВН та нижчим рівнем напруги системи. Компенсацію потрібно раціонально зреалізовувати між реактивною потужністю лінії та шини, щоб вона могла контролювати напругу під час різних операцій перемикання та унеможливлення коливань завдяки високому рівню компенсації.

На загал, пристрої компенсування реактивної потужності має бути розташовано на первинній, вторинній і третинній обмотці трансформатора НВН на основі загальних вимог щодо регулювання значення величини напруги та мінімізування загальних витрат. Принцип розміщення пристроїв компенсування реактивної потужності на первинній і вторинній обмотці трансформатора НВН однаковий, за винятком випадків, коли враховано питому вартість компенсування реактивної потужності та її ефективності регулювання величини напруги на первинному боці трансформатора НВН. Отже, перелік пристроїв компенсування реактивної потужності для первинного та вторинного боку трансформатора однаковий.

Основні етапи налаштування компенсації реактивної потужності для систем змінного струму НВН такі:

a) Визначте діапазон ймовірного значення передаваної активної потужності через лінію НВН, а потім обчисліть і проаналізуйте характеристики реактивної потужності та профілі напруги вздовж лінії НВН, враховуючи зарядну реактивну потужність, генеровану лініями НВН, і втрати реактивної потужності за різних умов потокорозподілення. Моделювання потрібно повторити для кожного сценарію, щоб визначити рівень компенсації, за якої забезпечується рівні напруги в прийнятних межах. Одним із методів цього є визначення потрібної компенсації на кожній шині за допомогою статичного синхронного компенсатора (СТАТКОМ) із великим діапазоном регулювання. Розрахований діапазон регулювання СТАТКОМ, який підтримує напругу на шинах на рівні 1,0 в.о. технічним засобом компенсування на цих шинах.

b) Виберіть положення відводів трансформатора НВН, щоб уникнути перенапруг за різних робочих умов, враховуючи розташування підстанції НВН, кількість під’єднаних ліній електропередавання та режим роботи системи.

c) Виберіть потужність і розташування лінійних шунтувальних реакторів НВН з урахуванням наведених нижче чинників:

1) обмеження тимчасових перенапруг та зменшення струму вторинної дуги;

2) балансування зарядної потужності ліній і гнучке керування напругою шин.

d) Визначте загальну та одиничну потужність компенсаторів, встановлених на третинній обмотці трансформатора. Загальну потужність потрібно вибирати так, щоб зменшити обмін реактивної потужності між різними рівнями напруги та підтримувати напругу на шинах у межах допустимого діапазону; вибір ємності однієї батареї має враховувати підтримування коливань напруги, викликаних перемиканням однієї батареї конденсаторів або реактора в обґрунтованому діапазоні. Встановіть динамічні межі реактивної потужності, яку забезпечують генератори в межах можливого діапазону.

e) Перевірте чи достатній динамічний запас реактивної потужності, який забезпечують генератори, в межах їхнього діапазону реактивної потужності. Якщо він адекватний, то процес перевіряння зупиняється; та потрібно вернутися до пункту г).

На рисунку 1 наведено процес планування компенсування зарядної потужності.

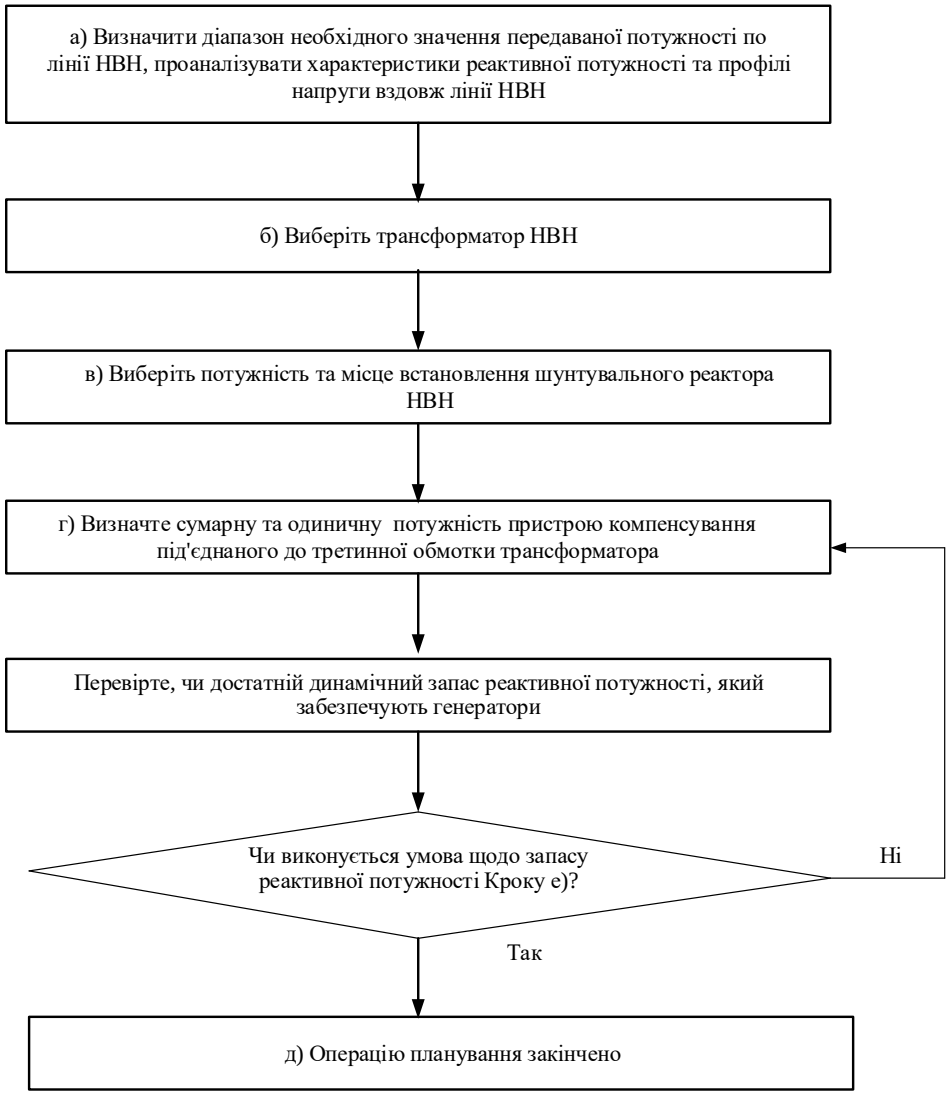

Рис.1. Блок-схема планування компенсування реактивної потужності

Визначення ступеня компенсації реактивної потужності

Компенсування реактивної потужності на боці НВН (первинна обмотка) належить до електроустаткування, яке безпосередньо під'єднано до лінії або шини змінного струму НВН, охоплюючи фіксовану потужність і керовані шунтувальні реактори. Поперечне НВН компенсування реактивної потужності в основному використовують для компенсування зарядної потужності лінії електропередавання НВН, обмеження тимчасових перенапруг та обмеження значення величини напруги до значень нижчих максимально робочої напруги під час живлення лінії електропередавання. Крім того, для обмеження струму вторинної дуги можна використовувати шунтувальний реактор з під'єднаними до нейтральної точки компенсаційним реактором.

Для компенсування реактивної потужності та обмеження перенапруг використовують шунтувальний реактор, під'єднаний до ЛЕП НВН. Для підстанцій з кількома короткими лініями зазвичай шунтувальний реактор під'єднано до шини, яку в основному використовують для компенсування зарядної потужності лінії електропередавання НВН.

Пристрій компенсування реактивної потужності під'єднано до третинної сторони трансформаторів НВН, в основному це шунтувальні конденсатори, шунтувальні реактори та СТАТКОМ які в основному використовують для забезпечення вимог щодо компенсування реактивної потужності системи НВН змінного струму для зменшення реактивної потужності трансформатора, втрат потужності та для регулювання напруги системи.

Потужність шунтувальних реакторів, під'єднаних по кінцях ліній електропередавання, можна розрахувати за формулою (1), наведеною нижче.

$$Q_{HR-total} = k_L Q_B, \quad (1)$$

де $Q_{HR-total}$ — потужність шунтувальних реакторів, яку потрібно встановити по кінцях лінії НВН; Q_B — значення величини зарядної реактивної потужності в ненавантаженому режимі роботи НВН; k_L – коефіцієнт компенсування;

Значення величини $k_L =$ зазвичай отримують на основі розрахунку перенапруги та балансу реактивної потужності, який зазвичай становить

менше ніж 0,85, щоб уникнути коливань під час перемикання. Якщо лінія коротка і лінійні реактори не потрібні, тоді вимогу щодо компенсування реактивної потужності може бути виконано компенсування реактивної потужності шини. Потребу в шунтувальному реакторі на лінії потрібно визначати, враховуючи ефект Ферранті під час подання напруги та обмеження короткотривалих перенапруг. Зазвичай приймають найближче уніфіковане значення реактивної потужності МВАр. Загалом, це компенсування реактивної потужності на затискачах ЛЕП.

Потужність для під'єднаного до шини шунтувального реактора можна розрахувати за формулою (2).

$$Q_{bus} = k_B(\sum \frac{1}{2}(Q_B - Q_X) - \sum Q_{HR}), \quad (2)$$

k_B– коефіцієнт компенсації, який зазвичай близький до 100 %; Q_X — втрати реактивної потужності лінії електропередавання в режимі холостого ходу, що майже дорівнюють нулю; $\sum \frac{1}{2}(Q_B - Q_X) =$ – сума зарядної потужності та втрат реактивної потужності половини довжини лінії всіх ліній електропередавання, під'єднаних до шини; Q_{HR} — становить половину загального значення $Q_{HR-total}$.$\sum Q_{HR}$ – сумарна потужність усіх реакторів, безпосередньо під'єднаних до ліній НВН на шині.

Загалом k_B для приймального кінця має бути вищим, ніж для передавального. Крім того, мають бути доступні реактори на шині генератора та шині приймального кінця за умов мінімального навантаження. Потрібно визначити лінійні та шинні реактори, за описаною вище методикою та перевіреною моделлю режимів.

Для ефективного використовування лінійного реактора, коли лінія не працює, можна встановити роз'єднувач між кінцем лінії та точкою з'єднання лінійного реактора. Коли лінія не працює, роз'єднувачі можна розімкнути та використати лінійний реактор як шинний реактор без лінії. Забезпечення шунтувальних реакторів автоматичними вимикачами можна розглядати тоді, коли реактивна компенсація не потрібна для обмеження комутаційних перенапруг.

Конфігурування шунтувальних конденсаторів із третинного боку трансформаторів НВН

Конфігурація третинних шунтувальних конденсаторів має компенсувати втрати реактивної потужності трансформаторів і половину чистих втрат реактивної потужності ліній електропередавання, під'єднаних до первинного та вторинного боків трансформатора НВН.

Потужність шунтувальних конденсаторів, під'єднаних до третинної обмотки можна розрахувати за формулами (3)-(8).

$$Q_{cap} = Q_{Tloss} - Q_{Hhalf} - Q_{Mhalf}, \quad (3)$$

де Q_{cap} — загальна потужність ємнісного компенсування.

$$Q_{Hhalf} = \sum(\frac{1}{2}(Q_{BH} - Q_{Hloss}) + Q_{HC}) - \sum Q_{HR}, \quad (4)$$

де Q_{BH}— зарядна потужність лінії НВН, під'єднаної до первинного боку НВН трансформатора; Q_{Hloss}— це втрати реактивної потужності лінії НВН, під'єднаної до вищого боку трансформатора НВН; Q_{HC} — потужність потрібної компенсації лінії НВН, під'єднаної до вищого боку трансформатора НВН; $\sum Q_{HR}$ – сума потужностей усіх реакторів, під'єднаних до ліній НВН вищого боку трансформатора НВН.

Ємність потрібного конденсатора визначають за формулою:

$$Q_{HC} = I_H^2 X_{HC}, \quad (5)$$

де I_H — номінальний струм лінії НВН, під'єднаної до вищого боку трансформатора; X_{HC} — реактивний опір потрібної компенсації, під'єднаної до лінії НВН обмотки вищої напруги трансформатора НВН.

$$Q_{Mhalf} = \sum(\frac{1}{2}(Q_{BM} - Q_{Mloss}) + Q_{MC}) - \sum Q_{MR}, \quad (6)$$

де Q_{BM} — зарядна потужність ліній, під'єднаних до обмотки середньої напруги трансформатора НВН; Q_{BM} — втрати реактивної потужності в лініях, під'єднаних до обмотки середньої напруги трансформатора НВН; Q_{MC}— потужність, яка потрібна для компенсування ліній, під'єднаних до обмотки середньої напруги трансформатора НВН; Q_{MR}— потужність реактора лінії, під'єднаного до обмотки середньої напруги трансформатора НВН.

Формула визначення потужності конденсатора, потрібного компенсування така:

$$Q_{MC} = I_M^2 X_{MC} \ , \quad (7)$$

де I_M — номінальний струм лінії, під'єднаної до обмотки середньої напруги трансформатора НВН;X_{MC} — реактивний опір потрібної компенсації лінії, під'єднаної до обмотки середньої напруги трансформатора НВН.

Втрати трансформатора:

$$Q_{Tloss} = (S_N/U_N)^2 X, \quad (8)$$

де Q_{Tloss}– значення величини втрат реактивної потужності трансформаторів; S_N– значення величини втрат повної потужність трансформатора НВН; U_N – діюче значення величини втрат напруги трансформатора НВН; X — значення величини втрат реактивного опору трансформатора НВН.

Конфігурація шунтувального реактора, під'єднаного до обмотки низької напруги трансформаторів НВН.

Назагал зарядна потужність ліній електропередавання має майже повністю компенсуватися з боку надвисокої напруги та шунтувальними реакторами, під'єднаних до обмотки низької напруги трансформаторів НВН.

Потужність шунтувальних реакторів, під'єднаних до обмотки низької напруги розраховують за формулою (9).

$$Q_{res} = \sum \frac{1}{2} Q_{BH} - \sum Q_{HR} \,, \tag{9}$$

де Q_{res}— значення величини потужності шунтувальних реакторів, під'єднаних до обмотки високої напруги; $Q_{BH} =$ — значення величини зарядної потужності лінії НВН, під'єднаної до обмотки високої напруги трансформатора НВН; Q_{HR} — це потужність реактора, під'єднаного до ліній НВН з боку високої напруги.

Здійснено огляд зарубіжного досвіду компенсації реактивної потужності в магістральних електричних мережах з метою розроблення систем автоматичного регулювання напруги та реактивної потужності, на основі застосування сучасних ЗКРП.

Висновок

Наведені в статті вимоги є базовою складовою для створення програмного забезпечення, призначеного для функціонування систем автоматизованого керування засобами компенсації реактивної потужності на електричних підстанціях надвисокої напруги. Вимоги забезпечують узгоджене управління всіма елементами ЗКРП у змінних умовах експлуатації, зокрема при зміні режимів роботи та конфігурації обладнання, що входить до складу електрино пов'язаних мережевих об'єктів.

Література

1. IEC TS 63042-101:2019 UHV AC transmission systems - Part 101: Voltage regulation and insulation design
2. Зайцев Є.О., Кучанський В.В., Гунько, І.О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустаковання. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 121 с
3. Кузнецов В. Г. Анормальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень : монографія / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський. – Одеса : Видавничий дім "Гельветика", 2025. – 170 с. ISBN 978-617-554-449-5/
4. Тугай Ю. І**.** Перенапруги в несиметричних режимах магістральних електричних мереж **:** монографія / Ю. І. Тугай, Ю. Г. Лиховид, В. В. Кучанський . Одеса : Видавничий дім "Гельветика", 2025. – 132 с. ISBN 978-617-554-544-7
5. Кучанський, В., Малахатка, Д. (2021). Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж. Монографія. https://doi.org/10.36074/ztzperrmrm-monograph.2021
6. Kundul S.; Ghosh T.; Maitra K. Acharjee; P.; Thakur S.S Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect // 2018 ICEPE 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology 1-2 June 2018 Shillong, India, India pp. 15-19 https://DOI:/10.1109/EPETSG.2018.8658729
7. Gu S., Dang J., Tian M., Zhang B.. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV/UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proceedings of International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering (MCE 2014), Shenyang, China August 29-31, 2014, pp. 65–68. https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14
8. Chandrasekhar R.; Chatterjee D.; Bhattarcharya T.. A Hybrid FACTS Topology for Reactive Power Support in High Voltage Transmission Systems IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society October 21-23, 2018 at the historic Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA, 2018 pp. 65-70. https://DOI:/10.1109/IECON.2018.8591988
9. Kuchanskyy V., Rubanenko O., Influence assesment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering. 2020. №82(3). P. 233-250.
10. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. Електротехніка та електромеханіка. 2018. № 2 С. 69 – 73. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.2.12
11. Кузнецов В. Г. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик анормальних перенапруг / В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. 2012. Вип. 31. С. 5–11.
12. Kuchanskyy, V. Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. Visnyk Nauk. Pr. Vinnytskoho Nastionalnoho Tekh. Univ. **2016**, 51–54. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]

13. Тугай, Ю., Кучанський , В., Тугай, І. (2021). Застосування керованих пристроїв компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН в електричних мережах. Технічна електродинаміка, (1), 53-56.

14. Zhenqiang, L., Chuanquan, L., Min, D.: 'Induced voltage and induced current on AC same tower four-circuit lines comprised of double-circuit 1000 kV lines and double-circuit 500 kV or 220 kV lines', High Volt. Eng., 2013, 39, (12), pp. 3022– 3028

15. Ban G. 750 kV reactive power control, automatic reclosing and overvoltage protection / G. Ban, L. Prikler, G. Banfai. // Bologna power tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna (Volume:2), June 23th – 26th, 2003, Italy. P. 1–8.

16. Brandao Faria J.A. Resonance effects due to conductor transposition in three– phase power lines / J.A. Brandao Faria, M.V. Guerreiro das Neves // Proceedings of 14th PSCC, Sevilla, 24–28 June 2002. – P. 10–15.

References

1. IEC TS 63042-101:2019 UHV AC transmission systems - Part 101: Voltage regulation and insulation design

2. Zaitsev E.O., Kuchanskyi V.V., Gunko, I.O. Increasing the operational reliability and efficiency of electrical networks and electrical equipment. Vinnytsia: NGO "European Scientific Platform", 2021. 121 c

3. Kuznetsov V.G. Abnormal overvoltages in main electrical networks with sources of distortions: monograph / V.G. Kuznetsov, Yu. I. Tugay, V.V. Kuchansky. - Odesa: Helvetika Publishing House, 2025 - 170 p. ISBN 978-617-554-449-5/

4. Tugay Yu. I. Overvoltageas in asymmetrical modes of main electrical networks: monograph / Yu. I. Tugay, Yu. G. Likhovid, VV Kuchansky. Odesa: Helvetika Publishing House, 2025 - 132 p. ISBN 978-617-554-544-7

5. Kuchansky, V., Malachka, D. (2021). Measures and technical means of improving the efficiency of modes of operation of main electrical networks. Monograph. https://doi.org/10.36074/ztzperrmrm-mograph.2021

6. Kundul S.; Ghosh T.; Maitra K. Acharjee; P.; Thakur S.S Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect // 2018 ICEPE 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology 1-2 June 2018 Shillong, India, India pp. 15-19 https://DOI:/10.1109/EPETSG.2018.8658729

7. Gu S., Dang J., Tian M., Zhang B.. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV/UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proceedings of International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering (MCE 2014), Shenyang, China August 29-31, 2014, pp. 65–68. https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14

8. Chandrasekhar R.; Chatterjee D.; Bhattarcharya T.. A Hybrid FACTS Topology for Reactive Power Support in High Voltage Transmission Systems IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society October 21-23, 2018 at the historic Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA, 2018 pp. 65-70. https://DOI:/10.1109/IECON.2018.8591988

9. Kuchanskyy V., Rubanenko O., Influence assesment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering. 2020. №82(3). P. 233-250.

10. Kuznetsov VG, Tugai Yu.I., Kuchansky VV, Likhovid Yu.G., Melnychuk VA Resonant overvoltages in non -sinusoid mode of the main electrical network. Electrical engineering and electromechanics. 2018. № 2 P. 69-73. DOI: 10.20998/2074-272x.2018.2.12

11. Kuznetsov V.G. Use of artificial neural network for determining the characteristics of anralized overvoltage / V.G Kuznetsov, V.V. Kuchansky, Yu. I. Tugay // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collection of Scientific Papers. 2012. Iss. 31. P. 5–11.

12. Kuchanskyy, V. Criteria of Resonance Overvoltages Occurrence in Abnormal Conditions of Extra High Voltage Transmission Lines. Visnyk Nauk. PR. Vinnytskoho Nacealnoho Tekh. Univ. 2016, 51-54

13. Tugay, Y., Kuchansky, V., Tugay, I. (2021). Application of managed devices of compensation for charging power of LPN in electrical networks. Technical electrodynamics, (1), 53-56.

14. Zhenqiang, L., Chuanquan, L., Min, D.: 'Induced Voltage and Induced Current on ac same tower-cir-circuit lines comprified of doubble-circut 10 kv lines an an lines an And 500 Kv lines of 10 kv. Lines', High Volt. Eng., 2013, 39, (12), pp. 3022– 3028

15. Ban G. 750 Kv Reactive Power Control, Automatic Reclocking and Overvoltage Protection / G. Ban, L. Prikler, G. Banfai. // Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna (Volume: 2), June 23th - 26th, 2003, Italy. P. 1–8.

16. Brandao Faria J.A. Resonance Effects Due to Conductor Transposition in Three - Phase Power Lines / J.A. Brandao Faria, M.V. Guerreiro Das Neves // Proceedings of 14th PSCC, Sevilla, 24–28 June 2002 - P. 10–15.