

УДК 621.327

М.М. Клименко, О.Ю. Єгорова

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Однією з основних характеристик електропередач є її пропускна здатність, тобто та найбільша потужність, яку можна передати по ЛЕП з урахуванням обмежуючих факторів: граничної потужності за умовами стійкості, втрат на корону, нагрівання провідників, потужність, що передається по ЛЕП змінного струму, пов'язана з її довжиною і напругою. В даній роботі визначені та обґрунтовані методи підвищення пропускної здатності в лініях електропередач постійного струму, аналіз шляхів підвищення пропускної здатності в лініях електропередач постійного струму.

Ключові слова: постійний струм, пропускна здатність, лінії електропередач.

Вступ

Передача електроенергії від електростанції до споживачів - одне з найважливіших завдань енергетики. Електроенергія передається переважно по лініях електропередачі (ЛЕП) змінного струму, хоча спостерігається тенденція до все більш широкого застосування кабельних ліній і ліній постійного струму.

Необхідність передачі електроенергії на відстань обумовлена тим, що електроенергія виробляється великими електростанціями з потужними агрегатами, а споживається порівняно малопотужними електроприймачами, розподіленими на значній території.

Тенденція до концентрації потужностей пояснюється тим, що з їх зростанням знижуються відносні витрати на спорудження електростанцій і зменшується вартість виробленої електроенергії.

Розміщення потужних електростанцій проводиться з урахуванням цілого ряду факторів, таких, наприклад, як наявність енергоресурсів, їх вигляд, запаси і можливості транспортування, природні умови, можливість роботи у складі єдиної енергосистеми і т.п. Часто такі електростанції виявляються суттєво віддаленими від основних центрів споживання електроенергії [1].

Від ефективності передачі електроенергії на відстань залежить робота єдиних електроенергетичних систем, які охоплюють великі території. Однією з основних характеристик електропередачі є її пропускна здатність, тобто та найбільша потужність, яку можна передати по ЛЕП з урахуванням обмежуючих факторів: граничної потужності за умовами стійкості, втрат на корону, нагрівання провідників і т.д. Потужність, що передається по ЛЕП змінного струму, пов'язана з її залежністю довжини та напруги. Для повітряних ЛЕП змінного струму максимальна передана потужність приблизно пропорційна квадрату напруги, а вартість спорудження ЛЕП про-

порційна напрузі. Тому в розвитку електропередач спостерігається тенденція до збільшення напруги як до головного засобу підвищення пропускної здатності ЛЕП. Граничні значення напруги ЛЕП, пов'язані з можливою перенапругою, обмежуються ізоляцією ЛЕП і електричною міцністю повітря. Підвищення пропускної здатності ЛЕП змінного струму можливо і шляхом удосконалення конструкції лінії, а також за допомогою включення різних компенсаційних пристроїв [2].

Основна частина

Повітряні ЛЕП охоплюють значну частину території Землі і мають величезну довжину. У зв'язку зі зростанням енергоспоживання виникає питання про збільшення їх пропускної здатності. Очевидне рішення проблеми нестача пропускної здатності - якщо її збільшити. Проте зазвичай це рішення вимагає великих витрат. Підвищення пропускної здатності ЛЕП досягається в основному за рахунок збільшення напруги, проте істотне значення має також зміна конструкції ЛЕП, введення різних додаткових компенсуючих пристроїв, при яких вплив параметрів, що обмежують передачу потужності, виявляються зменшеними.

Можливості подальшого підвищення граничних потужностей вимагають збільшення напруги та зміни конструкції ЛЕП. Вони пов'язані із загальним технічним прогресом, зокрема з успіхами в напівпровідниковій техніці, створенням досконалих матеріалів, розробкою нових видів передачі енергії. Для введення великих потужностей у великі міста та промислові центри розробляються кабелі з охолодженими струмоведучими жилами до температури рідкого азоту (77К) або рідкого гелію (близько 5К). У першому випадку (кріорезистивні кабелі) підвищення пропускної здатності досягається за рахунок значного зменшення активного опору мідних або алюмінієвих жил і, отже, джоулевих втрат, що дозволяє збільшити струмові навантаження. У кабелях

з рідким гелієм використовується ефект надпровідності [3].

В даний час інтенсивно досліджується поведінка ізоляції, просоченої рідким азотом і гелієм. Вплив пристроїв поздовжньої ємкісної компенсації. Основне призначення пристрою поздовжньої компенсації (КПК) – підвищення пропускної здатності і межі стійкості електропередачі. Лініями постійного струму можливо передавати великі об'ємні енергії на великі відстані в тих випадках, коли це економічно не вигідно виконувати на змінному струмі, а також виконувати передачу енергії по протяжним проводам кабелю. Вставки постійного струму використовують як спосіб об'єднання великих систем електропостачання, а також для розв'язання систем по частоті та якості електроенергії. Передачі та вставки постійного струму використовуються також, як регульовані елементи систем електропостачання, які дозволяють регулювати передану по лінії постійного струму або через вставку активну потужність, піддержувати напругу на шинах прийомної системи, модулювати потік потужності по лінії постійного струму для демпфірування низькочастотних коливань, які виникають в паралельній лінії змінного струму.

Одним із способів підвищення пропускної здатності ЛЕП є спорудження «розімкнених» ліній, у яких на опорах підвішуються проведення двох ланцюгів таким чином, що дроти різних фаз виявляються зближеними між собою. У електропередачах постійного струму відсутні багато чинників, властиві електропередачі змінного струму і обмежують їх пропускну здатність.

Гранична потужність, що передається по ЛЕП постійного струму, має більші значення, ніж в аналогічних ЛЕП змінного струму.

Обмеженість застосування електропередач постійного струму пов'язана головним чином з технічними труднощами створення ефективних недорогих пристроїв для перетворення змінного струму в постійний (на початку лінії) і постійного струму в змінний (в кінці лінії). Електропередачі постійного струму перспективні для об'єднання великих віддалених один від одного енергосистем. У цьому випадку відпадає необхідність у забезпеченні стійкості роботи цих систем.

Вважають, що для повітряних ЛЕП змінного струму максимальна передана потужність приблизно пропорційна квадрату напруги, а вартість спорудження ЛЕП пропорційна напрузі. Тому в розвитку електропередач спостерігається тенденція до збільшення напруги як до головного засобу підвищення пропускної здатності ЛЕП.

Будівництво лінії постійного струму в порівнянні з лінією змінного струму такої ж пропускної здатності вимагають значно менше основних мате-

ріалів і відповідно капітальних витрат. Пропускна здатність потужності лінії постійного струму визначається значенням і різницею напруг по кінцях лінії, обмежується активними опорами лінії і кінцевих пристроїв, а також потужністю перетворювальних підстанцій. Однак пропускна здатність потужності лінії постійного струму значно більше, ніж у лінії змінного струму [4].

Збільшення потужності в ЛЕП

У зв'язку з істотним збільшенням вартості будівництва нових високовольтних ліній електропередач зростає роль підвищення пропускної здатності існуючих і знову споруджуваних повітряних ЛЕП. Стає економічно вигідним збільшувати передану по лінії потужність аж до обмеження по нагріванню за рахунок застосування різних пристроїв.

Пропускна здатність ліній 220 – 750 кВ обмежується нагріванням проводів і стійкістю електропередачі. Причому із збільшенням довжини ліній другий фактор (стійкість) визначає межу переданої потужності.

Відомо, що передається по лінії без втрат активна потужність (АП) і споживана на її кінцях реактивна потужність (РП) залежно від кута передачі визначаються як:

$$\begin{aligned} P &= U_1 \cdot U_2 / X_L \sin \delta; \\ Q_1 &= U_1 \cdot (U_1 - U_2 \cos \delta) / X_L; \\ Q_2 &= U_2 \cdot (U_2 - U_1 \cos \delta) / X_L, \end{aligned} \quad (1)$$

де U_1 ; U_2 – напруги на початку і в кінці лінії;

X_L – індуктивний опір лінії;

δ – кут між векторами 1 і 2.

Обмеження переданої потужності P_0 викликані необхідністю забезпечити статичну стійкість у нормальному режимі з коефіцієнтом запасу по переданій потужності:

$$KР_{ЗАП} = (P_{ПР} - P_0 / P_0) \cdot 100\% > 20\%, \quad (2)$$

де гранична потужність

$$P_{ПР} = U_1 \cdot U_2 / X_L, \quad \text{при } \delta = \pi/2.$$

Забезпечена динамічна стійкість в аварійному режимі і передача необхідної потужності по ЛЕП в післяаварійному режимі з запасом $KР_{ЗАП}$ 8%.

З виразу (1) випливає, межа переданої потужності $P_{ПР}$ довгих ЛЕП може бути збільшена за рахунок зниження опорів лінії шляхом:

– поділу лінії на частини при установці в середині лінії статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності (СТК), істотне підвищення пропускної здатності ЛЕП відбувається в діапазоні кутів $900 < 1800$ або в так званій зоні штучної стійкості, в якій аварійне відключення СТК може призвести до втрати стійкості електропередачі;

– введення в лінію пристрою поздовжньої компенсації (ПК) з ємкісним опором ХС. Крім підвищення пропускної здатності лінії, ПК дозволяє перерозподілити потужність між паралельними лініями електропередачі через зміну опору ЛЕП.

Для перерозподілу потужності між паралельними зв'язками неоднакової довжини, а також різних класів напруг, застосовують фазоповоротні пристрої (ФПУ). Всі ці пристрої є класичними і змінюють передану по лінії потужність, впливаючи на один із трьох параметрів: СТК – на напругу; ПК – на опір лінії, а ФПУ – на кут передачі.

Гнучкі передавальні системи змінного струму

Пристрої на основі сучасної силової електроніки, створені для управління роботи електропередачі, здатні одночасно впливати на три зазначених вище параметра (U , X_L , δ), що підвищує ефективність і забезпечує гнучке управління режимами енергосистем. Їх застосування в електричних мережах мережевої компанії дозволить вирішити такі актуальні завдання:

- забезпечення видачі вводяться в експлуатацію потужностей електростанцій і надійного підключення нових навантажень споживачів;
- підвищення керованості потоками потужності в процесі передачі електроенергії між електрорайонами;
- посилення міжсистемних зв'язків та реалізація системних ефектів;
- реалізація проектів з експорту електроенергії.

Проте, надійність роботи енергосистем визначається балансами АП і РП у нормальних, аварійних і післяаварійних режимах. Перехід з одного стану в інший вимагає застосування для дотримання зазначених балансів в темпі процесів швидкодіючих пристроїв, які можуть бути створені тільки на основі силової електроніки.

Пропускна здатність електропередач та заходи для її підвищення

Під пропускну здатністю розуміється найбільша потужність, яку можна передати по лінії з урахуванням всіх маючих обмежень.

Обґрунтування пропускну здатності — це складна багатопланова задача. Пропускна здатність електропередачі визначається призначенням та роллю електропередачі в системі.

З збільшенням кількості ланцюгів збільшуються затрати на лінію, компенсуючі пристрої, спорудження підстанцій. При заданій переданій потужності збільшення числа ланцюгів приводить до підвищення втрат енергії від ємкісних струмів і втрат на корону, але з іншої сторони при цьому знижуються втрати енергії на нагрівання проводів і збільшується пропускна здатність електропередачі.

В енергетичних системах найбільшу частину напруги (приблизно 80%) складають асинхронні двигуни, в яких при допомозі обертового магнітного поля електрична енергія перетворюється в механічну. Наявність магнітних полів зв'язано в ланцюгах змінного струму з коливанням миттєвої потужності між споживачем і генератором, завантаженням реактивними струмами всіх проміжних елементів електричних ланцюгів-трансформаторів, ліній передачі, розподільних мереж.

Колівання потужностей визивають додаткові втрати потужності в усіх елементах ланцюга, обмежують пропускну здатність елементів ланцюга і створюють додаткові підвищення напруги в мережах, погіршуючи якість навантажувальної здатності елементів і для магнітно-діодних елементів зможе скласти десятки.

По-друге, емітерні перетворювачі послаблюють залежність рівня напруги U_1 від числа напруги. З виросту числа напруги збільшується вихідний струм, а рівень U_1 зменшується в наслідок збільшення падіння напруги на резисторі. Однак базовий струм транзистора УТЗ, протікаючий через цей резистор, в $0 + 1$ раз менше вихідного струму. З цього навантажувальна здатність елементів ЕСЛ значно вище, ніж елементів МЕСЛ.

Особливо велика статична навантажувальна здатність елементів – коефіцієнт розгалуження

$$n = 25 - 30 \text{ ч.}$$

Висока навантажувальна здатність пояснюється малим вхідним струмом кожного елемента. Вхідним струмом для кожного входу, наприклад для входу X_i , є базовий струм активного транзистора з генератором струму в ланцюгу емітера. Вхідний опір такого каскаду великий, а базовий струм малий (порядку 20 мкА). Однак при збільшенні числа підключених до виходу наступних елементів зростає паразитна ємкість напруги. Через збільшення ємкості напруги знижується швидка дія каскаду. Тому реальна навантажувальна здатність залежить від того, наскільки допустимо зменшення швидкої дії схеми при збільшенні числа підключаємих одночасно каскадів.

Необхідність перевантаження елементів системи електропостачання з'являється не тільки в після аварійних ситуаціях, але і внаслідок виросту системи промислового електропостачання: для забезпечення постійного збільшення електричної напруги необхідно враховувати перевантажувальну здатність елементів [5].

Нові шляхи підвищення пропускну здатності повітряних ліній і сучасні тенденції

В даний час існують рішення, які не мають недоліків вищеописаних засобів. Ці рішення забезпечують збільшення пропускну здатності наявних

ліній за рахунок застосування спеціальних проводів. Така постановка завдання приваблива як з технічної, так і з економічної точки зору.

На сьогоднішній день, висуваються такі вимоги до сучасних проводів:

- максимально висока електропровідність;
- максимально висока механічна міцність;
- невелика погонна маса;
- стійкість до високих температур;
- малі температурні подовження;
- стійкість до старіння і вітровим впливів.

Умови виконання вищеписаних вимог є конкуруючими, оскільки, найкраща міцність забезпечується сталлю, а найкраща електропровідність і мала маса алюмінієм.

Для отримання необхідної температурної стійкості розглядалося застосування дисперсійно-твердіючих матеріалів, цирконієвих сплавів, композитних та інших матеріалів, а також отриманням і впровадженням волокон оксиду алюмінію [6].

Проводи з підвищеною пропускнуою здатністю

Поверхня верхнього повиву проводу AERO-Z практично гладка, має незначні гвинтові канавки, що виникають між верхніми краями Z-образних проводів.

За рахунок цього конструкція проводу AERO-Z виходить більш компактною порівняно з проводом АС і при тому ж діаметрі має більший перетин алюмінію.

За рахунок того, що замість сталевго сердечника використовуються алюмінієвий дріт, провід має меншу масу.

Такі особливості тягнуть за собою менші механічні напруги в опорах у випадках застосування проводів рівного діаметра або дозволяють збільшити корисний електропровідний розтин при рівних механічних напругах в опорах. Щодо великої контактної поверхні між двома Z-образними проводами одного шару забезпечується ефективний захист від просочування консистентним мастилом зсередини проводу.

У зв'язку з цим, внутрішній захист виявляється краще, ніж у традиційних проводів АС, в яких з часом спостерігається витіснення захисного мастила назовні під дією циклів навантаження.

При обриві проводу зовнішнього повиву проводу AERO-Z залишаються на місці під дією механічних робочих напруг. Дана властивість зберігається до тих пір, поки не відбувається обрив п'яти суміжних проводів.

Збільшене самозагасання проводів трохи зменшує проблеми танці. Імовірність появи танці значно нижче, і, якщо вона виникає, її амплітуда буде значно менше. Хоча з цього питання достовірних експериментальних даних нам не відомо.

Провід AERO-Z має підвищену крутильну жорсткість, а тому теоретично краще протистоїть снігу і обмерзанню. Обледеніння відбувається одностороннє і тому зростає швидше, а збільшення маси ожеледі з одного боку призводить до його швидкого відриву.

Збільшення пропускнуої здатності проводів TACSR / ACS і (Z) TACSR / HACIN забезпечується їх більшою робочою температурою. Ці проводи стійкі до високої температури, можуть у нормальних умовах тривалий час нести більш високе електричне навантаження, ніж традиційні сталюалюмінієві проводи.

Лінії, що працюють в штатному режимі при температурі 1500°C проводів або 2100°C, не схильні до відкладення ожеледі, що означає як різке зниження ймовірності виникнення танці, так і зменшення ожеледних та вітрових навантажень на опори.

Навіть при збільшенні пропускнуої здатності в півтори рази по відношенню до проводу АС, високотемпературний провід має менший діаметр, що також дозволяє або знизити навантаження на опори, або збільшити прольоти лінії.

Проводи TACSR / ACS і (Z) TACSR / HACIN по конструкції не відрізняються від класичних проводів. Це дозволяє використовувати всі відомі типи арматури: спіральну арматуру, клинові затискачі і пресовані затиски. Звичайно, арматура повинна бути розрахована і для роботи з високотемпературними проводами.

Методики роботи та монтажу проводів Lumpi-Berndorf ідентичні методикам для класичного проводу АС. Не потрібно нових технологій і пристроїв та навчання персоналу.

Ще однією перевагою проводів TACSR / ACS Lumpi-Berndorf є їх невисока вартість – 270% від вартості АС за кілометр, що значно менше за всіх сучасних аналогів проводів підвищеної пропускнуої здатності.

Збільшення пропускнуої здатності проводів GTACSR забезпечується, також як і проводу «Lumpi Berndorf», більшою робочою температурою. Ці проводи стійкі до високої температури, можуть в умовах тривалого часу нести високе електричне навантаження.

Переваги конструкції проводу з зазором полягають у тому, що при монтажі і нагріванні після нього, вся тяжінь припадає на сталевий сердечник, і, відповідно, коефіцієнт розширення і модуль пружності, збігаються з характеристиками сталі. Тому провід значно менше схильний до подовження за рахунок зростання температури. При робочих температурах стріла провисання проводу відчутно менше, ніж для проводу АС.

Висока робоча температура проводу ACCR дозволяє пропускати високі струми, аналогічно прово-

дам Lumpi-Berndorf і J-Power Systems. Застосування сердечника, виготовленого з композитного матеріалу з малим коефіцієнтом температурного розширення і високою міцністю дозволяє отримати хороші механічні характеристики проводів навіть при високих температурах.

Застосування алюміній-цирконієвого сплаву в якості струмопровідної частини проводу дає можливість використовувати провід ACCR при підвищених температурах.

Сердечник, виконаний з композитних дротів, практично не поступається за механічним характеристикам сердечникам зі сталі.

Великий відсоток алюмінію в обсязі дротів сердечника дає значне збільшення в пропускній здатності проводу в порівнянні з проводами зі сталевим сердечником.

Висновки

З вище сказаного можна зробити висновки, що на відміну від міжсистемних зв'язків змінного струму передача постійного струму забезпечує:

1) пропускна здатність ЛЕП за рахунок застосування компактних або високотемпературних проводів може бути збільшена на величину від декількох десятків до кількох сотень відсотків по відношенню до проводів АС (ACSR);

2) у зв'язку з тим, що конструкція і робота проводів відрізняються від класичних, буде потрібно зміна розрахункових програм для проектування ліній, а також зміна підходу до оптимізації;

3) ефективність підвищення пропускної здатності перевищує додаткові витрати, дозволяє досягти необхідних струмів значно швидше і дешевше, знижує навантаження на опори.

Список літератури

1. Веников В.А., Дальние электропередачи / В.А. Веников. – М.-Л., Энергия, 1960. – 222 с.
2. Совалов С.А., Режимы электропередач 400–500 кв. ЕЭС / С.А. Совалов. – Т.3. Электрические системы. – Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения, М., 1972. – 260 с.
3. Веников В.А. Управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности / В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий // Электричество. – 1969. – № 12. – С. 7-11.
4. Ивакин В.Н. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы / В.Н. Ивакин, Н.Г. Сысоева, В.В. Худяков. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 188 с.
5. Сайт [news.elteh.ru](http://www.news.elteh.ru) [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/46/06.php>.
6. Александров Г.Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности / Г.Н. Александров // Электричество. – 1981. – № 7. – С. 47-53.

Надійшла до редколегії 12.01.2011

Рецензент: канд. техн. наук, доцент І.В. Пантелєєва Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

М.Н. Клименко, О.Ю. Егорова

Одной из основных характеристик электропередачи является ее пропускная способность, то есть та наибольшая мощность, которую можно передать по ЛЭП с учетом ограничивающих факторов: Предельной мощности по условиям устойчивости, потерь на корону, нагрева проводников, мощность, передаваемая по ЛЭП переменного тока, связанная с ее длиной и напряжением. В данной работе определены и обоснованы методы повышения пропускной способности в линиях электропередач постоянного тока, анализ путей повышения пропускной способности в линиях электропередач постоянного тока.

Ключевые слова: постоянный ток, пропускная способность, линии электропередач.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF EXISTING METHODS TO INCREASE CAPACITY OF POWER LINES

M.N. Klimenko, A.Yu. Egorova

One of the main characteristics is its power capacity, ie the largest capacity, which can be passed over power lines, taking into account limiting factors: Maximum capacity in terms of stability, loss of crown, heat conductors, power is transmitted by alternating current transmission lines associated with its length and tension. In this paper we define and justify methods of increasing capacity in the lines of DC power, an analysis of capacity enhancement in power lines DC.

Keywords: direct current, bandwidth, power lines.