

В. М. Сулейманов, канд. техн. наук, проф.; Т. Л. Кацадзе, канд. техн. наук, доц.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ РОЗГАЛУЖЕНИХ МЕРЕЖ ПРОТЯЖНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Розроблено математичні моделі та методи оптимізації режиму напруги та реактивної потужності в мережі протяжних ліній електропередачі, які мають загальну вузлову точку. Запропоновано математичні моделі оптимізації, які враховують хвильові процеси в лініях електропередачі.

Вступ

Енергетика України є базовою галуззю національної економіки, найважливішим фактором її розвитку. Очевидно, що стає функціонування та розвиток паливно-енергетичного комплексу визначає долю реформування енергетики та майбутнього України. На перспективу до 2030 р. в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України зберігається стратегія розвитку живлячих електричних мереж, де системоутворювальні функції видачі потужності крупних електричних станцій та забезпечення паралельної роботи з енергетичними системами інших держав, як і раніше, залишається за електричними мережами 330 та 750 кВ при суттєвому зростанні частки мереж надвисокої номінальної напруги.

Для забезпечення сталої роботи ОЕС України, ефективного та повного використання потужностей генеруючої частини ОЕС України, дотримання нормативних умов видачі потужностей Хмельницької, Рівненської та Запорізької атомних електростанцій та регульованих потужностей гідроакumuлюючих станцій, особливо Дністровської, необхідно в наміченій перспективі завершити формування двох транзитних магістралей 750 кВ – так званих південного (Хмельницька АЕС – Дністровська ГАЕС – ПС Приморська – ПС Каховська – Запорізька АЕС загальною довжиною 1050 км) та північного (Рівненська АЕС – ПС Київська – ПС Північно-Українська – ПС Харківська – ПС Донбаська, загальною довжиною 1200 км) поясів. Природно, що спорудження зазначених поясів з урахуванням заміни застарілого силового енергетичного обладнання потребуватиме залучення багатомілиардних інвестицій в енергетику України.

На сьогодні практика моделювання робочих режимів електричних систем, зокрема розв'язання задач оптимізації таких режимів, базується на моделюванні ліній електропередач схемами заміщення із зосередженими параметрами. Це є допустимим для моделювання ліній електропередачі невеликої довжини до 200–300 км. Але за наявності в електричній системі довших ліній електропередач вимагає застосування спеціальних математичних моделей, які мають враховувати рівномірний розподіл параметрів вздовж довжини таких ліній та хвильові процеси під час передавання по лініях електричної енергії внаслідок обмеженості швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж ліній електропередач.

У загальному випадку, під час виконання завдання вибору економічно вигідного режиму роботи електропередачі, слід здійснювати багатофакторну оптимізацію режимних параметрів, яка полягає у визначенні найвигіднішого розподілу активної потужності як між електричними станціями в поєднаних електропередачею енергосистемах, так і між окремими агрегатами на кожній з електростанцій; оптимального розподілу реактивної потужності між її регульованими джерелами; максимального зниження ступеня електричної неоднорідності замкнутої мережі системи; сприятливого режиму напруги в вузлових точках електропередачі [1]. Комплексне розв'язання цієї задачі є складним і громіздким. Тому в більшості практичних випадків здійснюють оптимізацію режимів роботи електропередачі, орієнтуючись лише на деякі найістотніші параметри [2].

В статті розглянуто розв'язання задачі оптимізації режимів напруг та реактивної потужності в системоутворювальній мережі ОЕС України в експлуатаційній постановці задачі, орієнтованій на мінімізацію сумарних втрат активної потужності в мережі.

Матеріали дослідження

Вираз для визначення сумарних втрат активної потужності у всіх лініях електропередачі, суміжних із заданою вузловою точкою, який враховує хвильові параметри дальніх електропередач, має вигляд

$$\Delta P_{\Sigma} = U^2 \sum_{i=1}^m a_{iU} + \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) + \sum_{i=1}^m a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^m a_{iQ} Q_i, \quad (1)$$

де a_{iU} – коефіцієнт втрат активної потужності за неробочого ходу i -ї лінії; a_{iI} – коефіцієнт втрат активної потужності в режимі навантаження i -ї електропередачі; a_{iP} , a_{iQ} – коефіцієнти втрат активної потужності, коли по i -й лінії передаються тільки активна та тільки реактивна потужності відповідно.

Коефіцієнти втрат активної потужності за умовами початку лінії визначають за виразами [3–5]:

$$\begin{aligned} a_U &= C'D' + C''D''; \\ a_I &= A'B' + A''B''; \\ a_P &= -2[B'C' + A''D'']; \\ a_Q &= 2[B''C' - A'D''], \end{aligned}$$

де штрихом позначена дійсна, а двома штрихами – уявна складова узагальнених сталих еквівалентного чотириполюсника моделі лінії електропередач.

Зазначимо, що за заданої постановки задачі всі електропередачі, які відходять від вузлової точки, розглядають як такі, що розраховують за умовами початку.

Метою оптимізації режиму є визначення напруги на шинах вузлової підстанції і потоку реактивної потужності на початку кожної з ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності в усіх суміжних лініях. Тут, залежно від вихідних умов, принципово можна виокремити п'ять різних підходів до оптимального регулювання напруги і реактивних потужностей у вузлових точках електричної мережі:

- 1) оптимальне регулювання напруги у вузловій точці за заданих реактивних потужностях в усіх лініях;
- 2) оптимальне регулювання реактивних потужностей в усіх суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці;
- 3) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності;
- 4) оптимальне регулювання режиму реактивної потужності у суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці та наявних обмежень за реактивною потужністю;
- 5) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності за наявних обмежень за реактивною потужністю.

Розглянемо задачу оптимального регулювання рівня напруги у вузловій точці за заданих реактивних потужностях в усіх лініях, що відходять від заданої вузлової точки. Зазвичай таку задачу розв'язують тоді, коли у всіх суміжних лініях реактивну потужність можна визначати заданим бажаним коефіцієнтом потужності у всіх можливих режимах електропередачі. Очевидно, що в такій ситуації оптимізації підлягає лише напруга на шинах вузлової підстанції. Її можна визначити, розв'язавши рівняння вигляду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$ – частинна похідна від сумарних втрат потужності за напругою у вузловій точці:

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial U} = 2U \sum_{i=1}^m a_{iU} - \frac{2}{U^3} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) = 0.$$

З останнього виразу оптимальна напруга на шинах опорної вузлової підстанції визначається як

$$U_o = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2)}{\sum_{i=1}^m a_{iU}}}. \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) свідчить про те, що оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначається параметрами всіх суміжних ліній та їх навантаженнями активною та реактивною потужностями.

Розглянемо розв'язання задачі оптимального регулювання реактивних потужностей у всіх лініях, що відходять від вузла, коли зафіксовані значення напруги на шинах вузлової підстанції. Таку задачу, зазвичай, розв'язують у ситуації, коли вузлова підстанція не обладнана засобами регулювання напруги або коли за наявності таких засобів у процесі ведення режиму електропередачі була досягнута межа регулювання. Отже, оптимізації підлягає тільки режим реактивної потужності у всіх суміжних лініях електропередачі.

Оптимальне значення реактивної потужності, яка супроводжує транзит активної потужності в кожній з ліній, можна визначити на підставі розв'язання низки рівнянь вигляду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$ – частинна похідна від сумарних втрат активної потужності за реактивною потужністю в i -й лінії. Спільне розв'язання рівнянь цього типу дає значення реактивної потужності в кожній із суміжних ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_i} = \frac{2a_{iI}}{U^2} Q_i + a_{iQ} = 0,$$

звідки оптимальне навантаження реактивною потужністю i -ї лінії визначається виразом

$$Q_{io} = -U^2 \frac{a_{iQ}}{2a_{iI}}. \quad (3)$$

Аналіз виразу (3) свідчить, що оптимальне значення реактивної потужності i -ї вітки не залежить від параметрів суміжних ліній і транзитивної активної потужності по лінії, а отже, його можна визначити лише за напругою на шинах вузлової підстанції. Зазначимо, що оптимальний режим реактивної потужності в кожній з ліній завжди має ємнісний характер. Тобто незалежно від режиму передавання по лінії активної потужності найоптимальнішою буде організація приймання з ліній їх ємнісної зарядної потужності.

Розглянемо задачу спільного оптимального регулювання режимів напруги на шинах вузлової підстанції та реактивних потужностей у всіх суміжних лініях. Тут необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь виду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$ та $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$ для кожної суміжної лінії, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$ та $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$ – частинні похідні від сумарних втрат потужності по напрузі в опорному вузлі та реактивної потужності i -ї лінії відповідно. Така задача є поєднанням двох попередніх.

Для оптимізаційної задачі з урахуванням хвильових параметрів ліній електропередач необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь (2) і (3), записаних для всіх ліній. В результаті оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначають за виразом

$$U_o = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^m a_{iI} P_i^2}{\sum_{i=1}^m \left(4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \right)}}.$$

Оптимальне значення реактивної потужності в i -й лінії знаходять за рівнянням

$$Q_{io} = -\frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m a_{iU} P_i^2}{\sum_{i=1}^m \left(4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \right)}}.$$

Розглянемо задачу оптимального розподілу наявної реактивної потужності за фіксованої напруги в опорному вузлі схеми. Таку задачу розв'язують у випадку, коли шуканий оптимальний режим реактивної потужності не може бути реалізований через обмеження реактивної

потужності в розглянутому вузлі схеми. Це потребує додаткового дотримання всіх можливих режимів суміжних ліній електропередачі умови балансу реактивної потужності на шинах вузлової підстанції електричної системи

$$\sum_{i=1}^m Q_i = Q_{к.п.}, \quad (4)$$

де $Q_{к.п.}$ — наявна реактивна потужність компенсуючих пристроїв вузлової підстанції (у тому числі генераторів електростанцій).

Розв'язання задачі полягає в такому розподілі наявної реактивної потужності вузла між суміжними лініями, щоб сумарні втрати активної потужності у всіх лініях характеризувалися відносними мінімумами.

Для розв'язання цієї задачі доцільно скористатися методом Лагранжа. За умови урахування хвильових параметрів дальніх ліній електропередач функцію Лагранжа можна подати у вигляді

$$\Phi = U^2 \sum_{i=1}^m a_{iU} + \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) + \sum_{i=1}^m a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^m a_{iQ} Q_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^m Q_i - Q_{к.п.} \right),$$

де λ — невизначений множник Лагранжа.

Частинні похідні від функції Лагранжа за реактивною потужністю кожної з ліній мають вигляд

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \frac{2Q_i a_{iI}}{U^2} + a_{iQ} + \lambda. \quad (5)$$

Нульові значення частинних похідних (5), доповнені рівнянням балансу реактивної потужності (4), утворюють систему рівнянь, кількість яких на одиницю більша від кількості ліній. Невідомими в цих рівняннях є потоки реактивної потужності в лініях Q_i і невизначений множник Лагранжа λ , що свідчить про можливість розв'язання такої системи алгебричних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial Q_1} = \frac{2Q_1 a_{1I}}{U^2} + a_{1Q} + \lambda = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial Q_2} = \frac{2Q_2 a_{2I}}{U^2} + a_{2Q} + \lambda = 0; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{к.п.} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язання системи рівнянь (6) дозволяє визначити оптимальну реактивну потужність кожної з ліній

$$Q_i = \frac{Q_{к.п.}}{a_{iI} \sum_{j=1}^m 1/a_{jI}} - \frac{U^2 \sum_{j=1}^m (a_{iQ} - a_{jQ})/a_{jI}}{2 a_{iI} \sum_{j=1}^m 1/a_{jI}}. \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що оптимальна реактивна потужність кожної з ліній містить дві складові. Перша з них являє собою частину наявної реактивної потужності вузлової підстанції, що спрямована в поточну i -ту лінію, яка завжди має ємнісний характер незалежно від режиму активної потужності в лінії. Друга складова не залежить від наявної реактивної потужності і її визначають лише за значенням напруги на шинах підстанції і відмінністю параметрів суміжних ліній. Ця складова може мати як ємнісний, так і індуктивний характер. Природно, алгебрична сума цих складових для всіх суміжних ліній завжди дорівнює нулю.

Отже, для мінімізації втрат активної потужності в лініях навіть без реактивної потужності у вузловій точці схеми доцільно завантажувати лінії різною за знаком реактивною потужністю, а для довгих ліній організувати приймання частини їх зарядних ємнісних потужно-

стей через завантаження коротших ліній індуктивною потужністю. Це призводить до певного збільшення втрат активної потужності в коротших лініях, але й одночасно до істотного зниження втрат активної потужності в довших лініях.

В окремому випадку, коли всі суміжні лінії мають однакові параметри, наявна реактивна потужність розподіляється між лініями порівню, а складова, зумовлена неоднорідністю параметрів лінії, дорівнює нулю.

Для розв'язання задачі оптимального розподілу наявної реактивної потужності за сумісного регулювання напруги в опорному вузлі систему рівнянь (6) слід доповнити рівнянням (2). Сумісним розв'язанням отриманої системи рівнянь можна визначити оптимальний розподіл наявної реактивної потужності пристроїв компенсації загального вузла мережі між суміжними лініями електропередачі і оптимальне значення напруги у вузловій точці, що забезпечує відносний мінімум сумарних втрат активної потужності у всіх лініях.

Розв'язуючи поставлену задачу, слід врахувати той факт, що наявна у вузлі реактивна потужність у загальному випадку має дві складові: реактивні потужності регульованих (Q_p) і нерегульованих ($Q_{н.р}$) пристроїв компенсації. Для регульованих компенсуювальних пристроїв, наприклад синхронних компенсаторів, реактивна потужність не залежить від значення напруги на шинах вузлової підстанції і визначається лише законом регулювання реактивної потужності. Навпаки, реактивна потужність нерегульованих компенсуювальних пристроїв, наприклад шунтувальних реакторів, визначається квадратом напруги на їх затискачах. Отже, наявна реактивна потужність загального вузла схеми

$$Q_{к.п} = Q_p + b_{н.р} U^2. \quad (8)$$

Вираз (8) потрібно включати до складу системи рівнянь, яка визначає оптимальні параметри режиму ліній електропередачі. У цьому разі останнє рівняння системи (6) набуває вигляду

$$\sum_{i=1}^m Q_i - Q_p - b_{н.р} U^2 = 0.$$

У результаті перетворення системи отримуємо бікватратне рівняння, розв'язання якого визначає оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції:

$$U_0^4 \left[\frac{\sum_{i=1}^m a_{iU}}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\sum_{j=1}^m (a_{iQ} - a_{jQ}) / a_{jI}}{a_{iI}} \right)^2} - \frac{b_{н.р}^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} \right] + U_0^2 \left[\frac{2b_{н.р}^2 Q_p}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} \right] - \frac{Q_p^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} - \sum_{i=1}^m P_i^2 a_{iI} = 0. \quad (9)$$

У рівнянні (9) фізичний зміст має більший за модулем додатний корінь.

Розроблені математичні моделі оптимізації робочих режимів магістральних електричних мереж протяжних ліній електропередач протестовані під час проведення розрахункового експерименту для фрагментів мережі 750 кВ ОЕС України, зокрема для вузлів підстанції Київська-750 та Південно-Української АЕС (ПУАЕС) з урахуванням перспективного розвитку мережі магістральних ліній напругою 750 кВ. Тут для шин розподільчого пристрою 750 кВ розглянуто розв'язання оптимізаційних задач для трьох ліній електропередачі: ПУАЕС – підстанція Вінницька; ПУАЕС – підстанція Дніпровська; ПУАЕС – Ісакча. Для енерговузла підстанції Київська розглянуто перспективну схему, яка містить існуючу лінію ПС Київська – ПС Вінницька та перспективні лінії ПС Київська – Хмельницька АЕС, ПС Київська – Рівненська АЕС (введення в експлуатацію у 2012 р.) та лінію ПС Київська – ПС Північно-Українська (введення в експлуатацію у 2020 р.).

Проведені розрахунки показали, що використання хвильових параметрів ліній електропередач в задачах оптимізації режимів напруги та реактивної потужності в електричній мережі дозволяє ввести режим напруги в зону оптимального регулювання та знизити сумарні втрати активної потужності в мережі ліній електропередач, поєднаних у вузловій точці.

Висновки

1. На сьогодні у вітчизняній практиці відсутній математичний апарат призначений для оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих магістральних ліній електропередач.
2. В роботі проведена розробка математичних моделей оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку із урахуванням можливих технологічних обмежень.
3. Обчислювальний експеримент підтвердив ефективність використання запропонованих оптимізаційних моделей порівняно з моделями, які не враховують хвильові процеси в дальніх лініях електропередачі.
4. Запропоновані математичні моделі та методологічні підходи до визначення оптимальних режимів напруги та реактивної потужності вимагають обов'язкового урахування хвильових процесів передавання електричної енергії лініями надвисокої номінальної напруги. Вони характеризуються високою надійністю та ефективністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сулейманов В. М. Вибір оптимальних схем побудови та режимів електроенергетичних систем на основі багатокритеріального аналізу : звіт про НДР 0108U002101 / В. М. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. — 128 с.
2. Экономия энергии в электрических сетях [Текст] / [И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов и др.]; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. — К. : Техніка, 1986. — 167 с.
3. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи : підручн. [Текст] / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — 456 с. — ISBN 978-966-622-300-8.
4. Сулейманов В. Н. Электрические сети и системы : учеб. [Текст] / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — К. : НТУУ «КПІ», 2007. — 504 с — ISBN 978-966-622-246-9.
5. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) [Текст] / В. Г. Холмский. — М. : Высш. шк., 1975. — 280 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 25.12.11

Сулейманов Віктор Миколайович — професор, **Кацадзе Теймураз Луарсабович** — доцент.

Кафедра електричних мереж та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ