

А. В. Красножон¹

ОЦІНЮВАННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГРОЗОЗАХИСНОМУ ТРОСІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

¹Чернігівський національний технологічний університет

Запропоновано метод оцінювання втрат потужності в грозозахисному тросі повітряних ліній електропередавання. На прикладі одноколової ЛЕП класу напруги 330 кВ показано, що величина втрат може бути значною.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, грозозахисний трос, магнітна індукція, магнітний потік, втрати активної потужності.

Вступ

Однією з найважливіших проблем в електроенергетичній галузі є зменшення втрат електричної енергії під час її передачі по лініях електропередавання (ЛЕП). З метою захисту повітряних ліній (ПЛ) електропередавання від прямих ударів блискавки в них використовуються грозозахисні троси (ГЗТ), які розташовуються вище фазних провідників.

Протягом довгого часу в Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) було передбачено, що ГЗТ поділяють на окремі ізольовані частини, кожна з яких заземлюється лише в одній точці. Поява ГЗТ типу ОКГТ (оптичний кабель в грозозахисному тросі) з вбудованими оптоволоконними лініями зв'язку зумовила внесення змін до ПУЕ. В новій редакції ПУЕ [1] записано, що «...незалежно від напруги ПЛ ОКГТ повинен, як правило, заземлятися на кожній опорі».

Слід зазначити, що за умови заземлення ГЗТ на кожній опорі ЛЕП в лінії утворюються замкнуті контури «ГЗТ—опора ЛЕП—земля—опора ЛЕП», через які проходить змінний магнітний потік, зумовлений струмами фазних провідників ЛЕП. Цей магнітний потік буде призводити до наведення в таких контурах е. р. с. індукції (згідно з правилом Ленца) і появи в них струмів, а також, відповідно, і втрат енергії на нагрівання. Зрозуміло, що енергія, яка витрачається на нагрівання ГЗТ, є частиною енергії, що передається по ЛЕП. Однак питання оцінювання таких втрат на сьогодні залишається невирішеним. Очевидно, що втрати енергії в ГЗТ суттєво будуть залежати від струму фазних провідників ЛЕП та від її довжини, тому задача оцінювання втрат потужності в ГЗТ є актуальною. Виконати таке оцінювання можна за допомогою методів теорії електричних кіл та теорії електромагнітного поля.

Основні матеріали досліджень

Із загальних міркувань теорії електричних кіл для розрахунку втрат потужності в ГЗТ повітряних ЛЕП необхідно знати повний комплексний опір ГЗТ та наведену на нього напругу. Останню можна знайти, якщо відома функція зміни в часі зчепленого з ГЗТ магнітного потоку, викликаного струмами фазних провідників ЛЕП. В свою чергу, для знаходження магнітного потоку необхідно знати магнітну індукцію від струмів фазних провідників. Оскільки ПЛ по суті являє собою набір провідників зі струмом, розташованих над провідною поверхнею (земля), то виконувати розрахунок магнітного поля можна, використовуючи відомий з теорії електромагнітного поля метод дзеркальних відображень [2, 3]. Згідно з цим методом вплив провідної поверхні можна замінити введенням в розгляд фіктивних провідників, струм яких має однакову з реальними провідниками величину, але протилежний напрямок.

Розглянемо застосування методу дзеркальних відображень для розрахунку зчепленого з ГЗТ трифазної повітряної ЛЕП магнітного потоку (рис. 1). На рис. 1 показано фазні провідники ЛЕП, ГЗТ та їх дзеркальні відображення. Також на цьому рисунку позначено важливі для розрахунку геометричні параметри та відстані, а саме: середні висоти підвішування фазних провідників ЛЕП (h_1, h_2, h_3), середню висоту підвішування ГЗТ (H), горизонтальні відстані між фазними провід-

никами та вертикальною проекцією ГЗТ (x_{01} , x_{02} , x_{03}). На рис. 1 показано зчеплені з ГЗТ силові лінії від диполя фази та її дзеркального відображення (теорію щодо цього питання розглянуто в [2, 3]). Ці силові лінії являють собою кола, центр яких не збігається з центром фазних провідників ЛЕП. Розрахунок зчепленого з ГЗТ магнітного потоку від диполя кожної фази та її дзеркального відображення згідно з принципом неперервності магнітного потоку можна проводити по шляху, який розпочинається з найвищої точки (H_{eqv1} , H_{eqv2} , H_{eqv3}), вищезазначеної силовій лінії та розташований перпендикулярно поверхні землі (такі шляхи для всіх диполів позначені на рис. 1 штрих-пунктирними лініями).

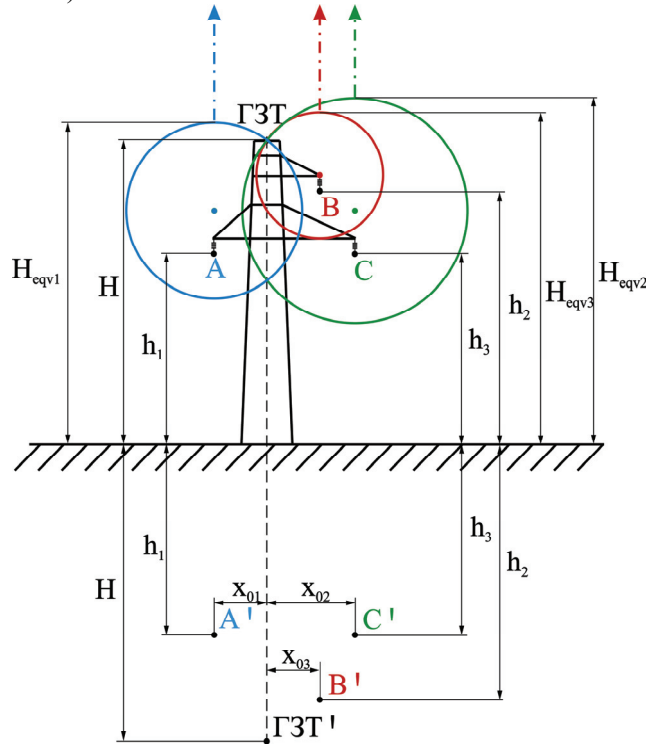


Рис. 1. Застосування методу дзеркальних відображень для розрахунку зчепленого з ГЗТ магнітного потоку від диполів фаз ЛЕП та їх дзеркальних відображень

Магнітна індукція на відстані r від фазного проводу (над ним) розраховується за формулою

$$B(r, h, I_m) = \frac{I_m \cdot \mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{2h+r} \right), \quad (1)$$

де r — відстань від проводу до точки, в якій визначають магнітну індукцію; I_m — амплітуда струму фази; h — висота підвішування фази (середня); μ_0 — магнітна проникність вакууму.

Формула (1) записується на основі закону повного струму [2, 3] та враховує той факт, що в просторі над фазним провідником індукції, створені струмом цього провідника та його дзеркального відображення, мають протилежний напрям.

Відстань від землі до найвищої точки зчепленої з ГЗТ силовій лінії від диполя фази та її дзеркального відображення можна визначити за формулами

$$r_1(H, h, x_0) = \sqrt{(H-h)^2 + x_0^2}; \quad (2)$$

$$r_2(H, h, x_0) = \sqrt{(H+h)^2 + x_0^2}; \quad (3)$$

$$k(H, h, x_0) = \frac{r_1(H, h, x_0)}{r_2(H, h, x_0)}; \quad (4)$$

$$H_{eqv}(H, h, x_0) = \frac{1+k(H, h, x_0)}{1-k(H, h, x_0)} h, \quad (5)$$

де r_1 — відстань від центру фазного провідника до центра ГЗТ; r_2 — відстань від центра дзеркального зображення (фіктивного) фазного провідника до центра ГЗТ; H_{eqv} — відстань від землі до найвищої точки зчепленої з ГЗТ силової лінії від диполя фази та її дзеркального відображення.

Амплітуду зчепленого з ГЗТ магнітного потоку від диполя фази та її дзеркального відображення визначаємо за формулою

$$\Phi_m(h, H, x_0, I_m) = l \cdot \int_{H_{eqv}(h, H, x_0) - h}^{\infty} B(r, h, I_m) dr, \quad (6)$$

де l — довжина ЛЕП.

Слід зазначити, що інтегрування у формулі (6) ведеться вздовж координати r циліндричної системи координат, початок якої збігається з центром фазного провідника, при цьому мінімальне значення координати r дорівнює $H_{eqv}(H, h, x_0) - h$, тобто відстані між центром фазного провідника та найвищою точкою зчепленої з ГЗТ силової лінії від диполя фази та її дзеркального відображення, а максимальне координати r дорівнює ∞ .

Зчеплений з ГЗТ сумарний магнітний потік від всіх трьох фаз ЛЕП дорівнює

$$\begin{aligned} \Phi \Sigma(t) = & \Phi_m(h_1, H, x_{01}, I_m) \sin(\omega t) + \Phi_m(h_2, H, x_{02}, I_m) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & + \Phi_m(h_3, H, x_{03}, I_m) \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

В останній формулі враховано, що магнітні потоки фазних провідників ЛЕП, як і струми, що їх викликають, зсунуті на 120° .

Знаючи функцію зміни в часі зчепленого з ГЗТ магнітного потоку, визначаємо наведену на ГЗТ напругу згідно з законом електромагнітної індукції (правило Ленца):

$$u(t) = \frac{d\Phi \Sigma(t)}{dt}. \quad (8)$$

Очевидно, що зчеплений з ГЗТ магнітний потік, який створено синусоїдальними струмами фазних провідників ЛЕП, теж буде синусоїдальним. Тоді, згідно з формулою (8), наведена на ГЗТ напруга також буде синусоїдальною, отже, завжди можна буде визначити діюче значення цієї напруги U .

Індуктивність контуру, який складається з ГЗТ та його дзеркального відображення, можна визначити за формулою індуктивності безмежно довгої двопровідної лінії [3]

$$L = \frac{l \cdot \mu_0}{\pi} \left(\ln\left(\frac{4H}{d}\right) + \frac{l}{4} \right), \quad (9)$$

де d — діаметр ГЗТ.

Оскільки реально дзеркального відображення ГЗТ не існує, то отримане значення індуктивності слід зменшити вдвічі, тоді отримуємо остаточний вираз для індуктивності ГЗТ:

$$L = \frac{l \cdot \mu_0}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{4H}{d}\right) + \frac{l}{4} \right). \quad (10)$$

Індуктивний опір ГЗТ визначаємо за формулою

$$X_L = \omega \cdot L, \quad (11)$$

де ω — циклічна частота мережі.

Знаючи погонний активний опір r_0 вибраної марки ГЗТ, можна визначити активний опір всього ГЗТ:

$$R = r_0 \cdot l. \quad (12)$$

Модуль повного комплексного опору ГЗТ

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (13)$$

Діюче значення наведеного в ГЗТ струму визначаємо за формулою:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (14)$$

Втрати активної потужності на всій довжині ГЗТ складатимуть:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (15)$$

На основі вищезазначеного проведено оцінювання втрат потужності в ГЗТ однофазної повітряної ЛЕП класу напруги 330 кВ, виконаної на опорах типу ПС330-2 (геометричні параметри даного типу опор взято з [4]). Діюче значення струму у фазах ЛЕП приймалось рівним 400 А, довжина лінії — 100 км. В якості ГЗТ взято трос марки OPGW-136-AL-3/68-A20SA, який має погонний активний опір 0,201 Ом/км.

Згідно з проведеними розрахунками діюче значення наведеного струму дорівнює 30,3 А, втрати потужності в ГЗТ складають 18,45 кВт (на 100 км довжини лінії). Порівняно з потужністю, що передається по ЛЕП, величина втрат є достатньо малою, однак, слід врахувати, що ці втрати виникають в ГЗТ протягом всього строку експлуатації ЛЕП.

Також було оцінено річні втрати електричної енергії в ГЗТ, скориставшись методом тривалості максимальних втрат [5]. Для цього використовують величину тривалості максимальних втрат τ_{\max} — це такий умовний час (в годинах), протягом якого лінія, працюючи з незмінним максимальним навантаженням (при якому в ГЗТ виникають максимальні втрати потужністю P_{\max}), має втрати електроенергії в ГЗТ, рівні дійсним річним втратам електроенергії в ньому за умови роботи з реальним річним графіком навантаження. Враховуючи вищезазначене, величину втрат енергії в ГЗТ за рік визначаємо за формулою

$$\Delta W = P_{\max} \cdot \tau_{\max}. \quad (16)$$

В наближених розрахунках величину τ_{\max} визначають за емпіричною формулою

$$\tau_{\max} = \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760,$$

де T_{\max} — тривалість використання максимального навантаження ЛЕП.

Для ліній 330 кВ $T_{\max} = 3500 - 5700$ год/рік [5]. Для випадку, коли $T_{\max} = 5700$ год/рік, за формулою (17) можна отримати $\tau_{\max} = 4219$ год. Якщо прийняти максимальні втрати потужності в ГЗТ $P_{\max} = 18,45$ кВт, то згідно з виразом (16) можемо отримати величину річних втрат потужності $\Delta W = 77,84$ тис. кВт·год. на рік. Ціна електричної енергії на оптовому ринку станом на січень 2015 року становила 0,751 грн/кВт·год, відповідно, можна отримати величину збитків від втрат в ГЗТ — 58,45 тис. грн/рік. Зважаючи на те, що строк експлуатації ЛЕП становить 40—50 років, то величина збитків за весь строк експлуатації досягне декількох мільйонів гривень.

Висновки

Розроблено метод оцінювання втрат активної потужності в грозозахисному тросі повітряних ліній електропередавання та на прикладі однофазної ЛЕП класу напруги 330 кВ показано, що величина втрат може бути значною.

Запропонований метод оцінювання втрат в ГЗТ повітряних ЛЕП відкриває широкі можливості для подальших досліджень, таких як визначення втрат в ГЗТ ЛЕП різного класу напруги за умови використання різних типів опор, визначення впливу типу ГЗТ на величину втрат, розробка методів боротьби з втратами в ГЗТ і т. д.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. — К. : Форт, 2010. — 736 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учеб. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. — 8-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. — М. : Высш. шк., 1986. — 263 с.
3. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. — М.-Л. : Энергия, 1967. — Т. 2. — 407 с.
4. Макаров Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4—35 кВ и 110—1150 кВ / Е. Ф. Макаров. — М. : Папирус Про, 2003. — Т. 2. — 640 с.
5. Зорін В. В. Електричні системи і мережі : навч. посіб. для студентів вищ. техн. навч. закл. / В. В. Зорін, Р. О. Буйний. — Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. — 248 с.

Красножон Андрій Васильович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електричних систем і мереж, e-mail: red_john@ngs.ru.

Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів

A. V. Krasnozhon¹

Evaluation of Active Power Losses in Grounding Wire of Overhead Power Lines

¹Chernigiv National University of Technology

A method of evaluation of power losses in grounding wire of overhead power lines has been proposed. On the basis of single-circuit transmission lines of 330 kV voltage class there has been shown that the amount of the losses can be significant.

Keywords: overhead power line, grounding wire, magnetic induction, magnetic flux, active power losses.

Krasnozhon Andrii V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Power Networks and Systems, e-mail: red_john@ngs.ru

А. В. Красножон¹

Оценка потерь активной мощности в грозозащитном тросе воздушных линий электропередачи

¹Черниговский национальный технологический университет

Предложен метод оценки потерь мощности в грозозащитном тросе воздушных линий электропередачи. На примере одноцепной ЛЭП класса напряжения 330 кВ показано, что величина потерь может быть значительной.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, грозозащитный трос, магнитная индукция, магнитный поток, потери активной мощности.

Красножон Андрей Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электрических систем и сетей, e-mail: red_john@ngs.ru