

СКІН-ЕФЕКТ В ПРОВОДАХ ЛІНІЙ НАДВИСОКОЇ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ

Яцура Б. О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. Оголені багатожильні алюмінієві провідники, зі сталевими армованими жилами та без них, використовуються понад 80 років для передачі електроенергії високою напругою. Ці провідники складаються з одного або кількох шарів алюмінієвих проводів, скручених концентрично (з чергуванням правого та лівого напрямків). У разі армування сталлю, сердечник провідника складається з одного або кількох оцинкованих сталевих дротів. Сталева серцевина та алюмінієві шари забезпечують механічну міцність, але алюмінієві дроти несуть більшу частину струму.

Мета роботи. Дослідження впливу скін-ефекту на експлуатаційні характеристики проводів повітряних ліній надвисокої номінальної напруги.

Матеріали і результати досліджень. Розподіл густини струму в будь-якому провіднику, по якому проходить змінний струм, рідко буває рівномірним. В ізолюваному провіднику струм має тенденцію протікати з більшою щільністю в крайніх частинах, найбільш віддалених від осі провідника. Ефект стає більш вираженим, якщо частота стає високою, або коли перетин провідника стає великим. Результатом роботи круглого дроту або трубки, коли частота є високою, є те, що струм зосереджується у зовнішній оболонці провідника [1].

Насправді навіть виникає умова, коли через ядро не проходить абсолютно ніякий струм, який концентрує всю його кількість на поверхні, збільшуючи таким чином ефективний електричний опір провідника, рис. 1. Ця конкретна тенденція системи передачі змінного струму використовувати поверхневий шлях для потоку струму, що позбавляє ядро, називається скін-ефектом в лініях електропередавання.

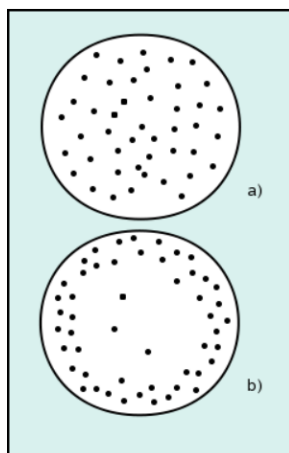


Рисунок 1 – Розподіл щільності струму в твердому провіднику при проходженні ним: а) постійного струму і б) змінного струму

Таке явище не грає особливої ролі у випадку дуже короткої лінії, але зі збільшенням ефективної довжини провідників, скін-ефект значно зростає. Найбільше це проявляється в лініях надвисокої номінальної напруги 330-750 кВ.

Скін-ефект в системі змінного струму залежить від деяких факторів, таких як [4]:

- Робоча частота – скін ефект посилюється зі збільшенням частоти (в Україні промислова частота змінного струму в електромережах становить 50 Гц);

- Тип матеріалу – скін-ефект посилюється зі збільшенням проникності матеріалу;

- Діаметр провідника – скін-ефект збільшується зі збільшенням діаметра провідника;

- Форма провідника – скін-ефект більший у суцільних провідниках, оскільки площа поверхні твердих провідників вища.

Електрони, що рухаються біля поверхні провідника і вносять свій внесок в електричний струм, піддаються дії магнітного потоку від інших електронів, що рухаються, меншою мірою, ніж ті електрони, які знаходяться в провіднику на великих глибинах [3].

Це пояснюється тим, що поверхневі електрони зазнають впливу сусідніх електронів тільки з одного боку, тоді як глибинні електрони оточені сусідніми електронами з усіх боків. Оскільки глибинні електрони, що у створенні змінного струму, перебувають під впливом сильнішого магнітного поля, до них прикладена велика сила Ленца.

Розглядаючи ці умови під іншим кутом зору, можна сказати, що глибинні електрони характеризуються більшою взаємною індуктивністю по відношенню до сусідніх електронів, ніж поверхневі електрони.

Отже, для електронів легше змінити свій рух, якщо вони знаходяться поблизу поверхні провідника порівняно з електронами, що знаходяться глибше.

Оскільки носії завжди вибирають оптимальну траєкторію (відповідну умові мінімальної енергії), в даному випадку носії, що утворюють змінний струм, під дією бічних сил Ленца переміщуються назовні, в мінімальну область взаємної індукції, тобто до поверхні провідника [3].

Коефіцієнт скін-ефекту k_{sk} визначається як співвідношення між опором змінного і постійного струму. Для однорідного провідника, багатожильного провідника з кольорових металів, або провідників з феромагнітним матеріалом у серцевині та непарною кількістю ниток, рівняння для отримання коефіцієнта скін-ефекту описані нижче.

Електричне поле на одиницю величини струму — це комплексне число, дійсну частину якого можна записати у вигляді (1) [2]:

$$\left(\frac{E}{I}\right)_R = \operatorname{Re} \left[\frac{\rho \cdot (1-j)}{D \cdot \pi \cdot \delta} \cdot \left(\frac{J_0}{J_1} \right) \right] \quad (1)$$

де D – діаметр однорідного провідника, або зовнішній діаметр трубчастого провідника;

δ –глибина скін-шару;

J_0 – функція Бесселя першого роду і нульового порядку;

J_1 – функція Бесселя першого роду і першого порядку;

ρ – питомий опір матеріалу.

Глибину скін-шару визначають як глибина, на якій щільність струму становить $1/e$ або $\approx 37\%$ від його значення на поверхні. Це функція частоти, відносної проникності та питомого опору матеріалу провідника. Питомий опір збільшується з підвищенням температури, внаслідок чого глибина шкіри також збільшується з підвищенням температури. Тому при вищих температурах фактор скін-ефекту нижчий (2) [2].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{4 \cdot f \cdot \pi^2 \cdot \mu_r \cdot 10^{-7}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{10^7 \cdot \rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (2)$$

де f – частота;

μ_r – відносна проникність матеріалу провідника.

Загальним виразом функції Бесселя будь-якого порядку ϵ :

$$J_n = x^n \cdot \sum \left[\frac{(-1)^m \cdot x^{2m}}{2^{2m+n} \cdot m! \cdot (m+n)!} \right] \quad (3)$$

де $m=0..\infty$;

n – порядок функції Бесселя, $n=0$ для J_0 і $n=1$ для J_1 ;

x – змінна функції Бесселя, $x = \frac{(1-j) \cdot D}{2 \cdot \delta}$.

Для діапазону частот потужності та діапазону провідників, що використовуються для повітряних ліній, вираз можна спростити з достатньою точністю як (4, 5) [2]:

$$J_0(x) = \left[1 - \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^4 - \frac{1}{36} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^6 \right] \quad (4)$$

$$J_1(x) = \left[\frac{x}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2}\right)^3 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^5 - \frac{1}{144} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^7 \right] \quad (5)$$

Використовуючи наведені вище вирази, обчислення здається досить простим і зрозумілим для будь-якого застосування. Єдина очевидна складність може полягати в тому, щоб мати справу з комплексними числами. Однак, ігноруючи це в такій моделі, розрахунок значень опору змінному струму дасть неправильні результати.

Фактор скін-ефекту можна записати так:

$$k_{sk} = \frac{D^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{E}{I}\right)_R}{4 \cdot \rho} \quad (6)$$

При розрахунку скін-ефекту трубчастого провідника або трубки, яка є провідною частиною АС та подібного провідника, скін-ефект буде результатом співвідношення між розрахунками електричного поля для зовнішнього та внутрішнього діаметрів трубки і може бути розрахований таким чином:

$$k_{sk(tube)} \approx 1 + (k_{sk(D)} - 1) \cdot \left(1 - \frac{D_1}{D}\right) \quad (7)$$

де D_1 – внутрішній діаметр трубчастого провідника або зовнішній діаметр сталевий сердечника в АС та подібних провідниках.

На рис. 2 представлено залежність коефіцієнту скін-ефекту від радіусів провідників а також область відхилення у результатах через використання спрощеної математичної моделі розрахунку. Варто зазначити, що для будь-якого розрахунку, пов'язаного із впливом скін-ефекту, доцільніше використовувати аналітичні вирази, описані вище.

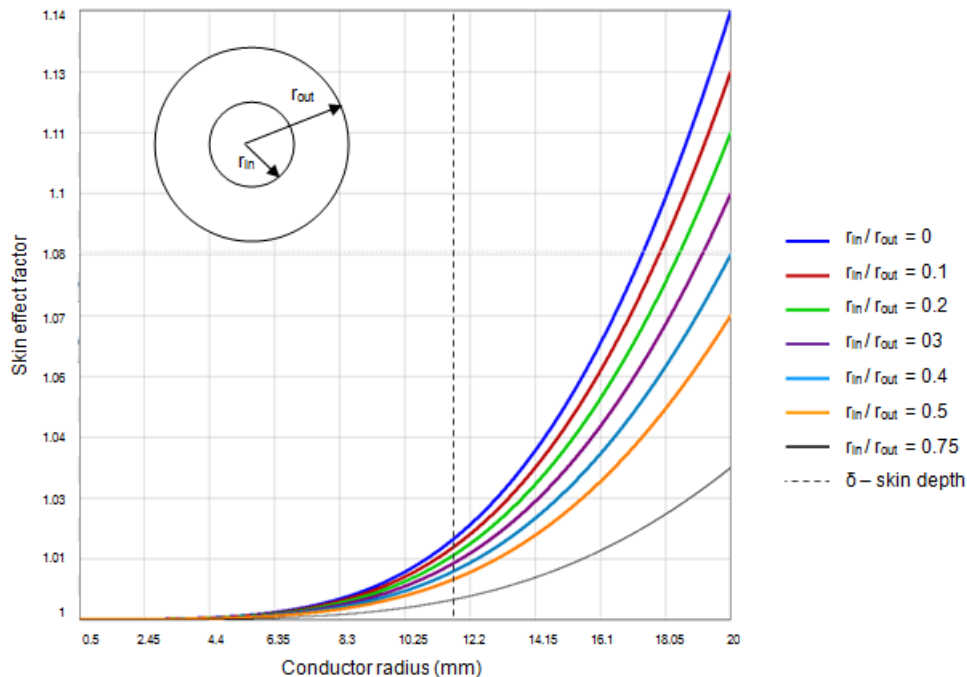


Рисунок 2 – Приклад графіка залежності коефіцієнту скін-ефекту від радіусу зовнішнього провідника для різних співвідношень r_{in}/r_{out}

Представлені вище результати свідчать, серед іншого, про те, що найкращим рішенням для розрахунку скін-ефекту для будь-якого провідника, включаючи тип АС, є припущення твердого провідника з діаметром, еквівалентним діаметру зовнішнього шару, і з загальним опором провідника, включаючи сталевий сердечник, якщо він застосовується. Наступним кроком для багатожильних провідників є те саме обчислення, але виходячи з припущення, що радіус провідника еквівалентний середньому геометричному радіусу (GMR).

Середній геометричний радіус являє собою радіус однорідного провідника з еквівалентною індуктивністю. Значення щодо зовнішнього радіуса (витого) провідника регулярно наводяться в каталогах або довідниках для конкретного провідника. За відсутності цього, GMR можна розрахувати за загальною формулою (8) [2]:

$$GMR = N^2 \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^N d_{k,m} \right)} \quad (8)$$

де d_{km} – відстань між жилами/проводами для всіх $k \neq m$ або r' для всіх $k=m$ з урахуванням $r' = e^{-1/4} \cdot r$;

r – радіус провідника.

Максимальне можливе відхилення від того, що можна вважати точним результатом, знаходиться в районі від 1 до 2 % опору провідника і визначається переважно за рахунок нехтування скін-ефектом у сталевому осерді.

Було проведено розрахунок коефіцієнту скін-ефекту для проводів марки АС з різними номінальними перерізами. Результати для всіх перерізів наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнт скін-ефекту для проводів марки АС з різними номінальними перерізами

| Номінальний переріз, мм ² | Діаметр провода, мм ² | Переріз, мм ² | | Коефіцієнт скін-ефекту |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------|------------------------|
| | | алюмінію | сталі | |
| АС-70/11 | 11,4 | 68 | 11,3 | 1,001 |
| АС-240/32 | 21,6 | 244 | 31,7 | 1,014 |
| АС-330/43 | 25,2 | 332 | 43,1 | 1,025 |
| АС-400/51 | 27,5 | 394 | 51,1 | 1,035 |
| АС-500/64 | 30,6 | 490 | 63,5 | 1,054 |

Висновки. Проаналізувавши результати у табл.1, можна замітити, що зі збільшенням перерізу та діаметра провідника, дія скін-ефекту пропорційно збільшується. Для проводу АС-70/11, скін-ефект становить всього 0,1%, для АС-240/32 – 1,4%, для АС-330/43 – 2,5%, для АС-400/51 та АС-500/64 – 3,5% та 5,4% відповідно. Це в свою чергу, підтверджує твердження, що таке явище, як скін-ефект не грає особливої ролі у випадку дуже короткої лінії, але зі збільшенням ефективної довжини провідників, це явище значно зростає. Найбільше це проявляється в лініях надвисокої номінальної напруги 330 – 750 кВ.

Перелік посилань

1. Alternating current (ac) resistance of helically stranded conductors WG B2.12; D. Douglass (USA), M. Gaudry (FR), T. Seppa (USA), R. Stephen (ZA), D. Muftic (ZA), S. Ueda (BR), A. Goel (CA), R. Kimata (JP), S. Hoffman (UK), J. Iglesias-Diaz (ES), F. Massaro (IT), B. Risse (BE), L. Varga (HU), V.T. Morgan (AU). – 2008. – p. 59.

2. Guide for thermal rating calculations of overhead lines WG B2.43; Thadeu FURTADO (BR), Stefan STEEVENS (DE), Sergey KOLOSOV (RU), Konstantin KONAKOV (RU), Mark LANCASTER (US). – 2014. – p. 95.

3. Що таке скін-ефект і де це застосовується. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://elektrik.info/main/school/1707-что-такое-skin-effekt-i-gde-on-rimanyaetsya.html>

4. Skin Effect in Transmission Lines. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.electrical4u.com/skin-effect-in-transmission-lines>