

ГЕОМАГНІТНІ ІНДУКЦІЙНІ СТРУМИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Кирик В.В., д.т.н., проф., Іваніцький С.Б., аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. Аварійні ситуації в електроенергетичних системах (ЕЕС) непередбачувані та можуть бути викликані багатьма факторами: відмовою обладнання, неправильними та неузгодженими діями обслуговуючого персоналу, а також різними природними впливами, до яких належать і геомагнітні збурення, які, відповідно, спричиняють виникнення геомагнітних індукційних струмів (ГІС). Існує велика ймовірність того, що чинником аварійних вимикань магістральних ліній електропередавання за невстановлених причин в ОЕС України за останні роки є саме геомагнітні індукційні струми [1].

Мета роботи. Аналіз причин виникнення геомагнітних збурень та геомагнітних індукційних струмів, їх вплив на роботу обладнання електричних мереж та електроенергетичних систем. Розгляд існуючих засобів зниження впливу ГІС на обладнання електричних мереж.

Матеріали та результати роботи. Причиною геомагнітних збурень є турбулентні викривлення магнітного поля Землі внаслідок потоків сонячного вітру, який призводить до порушення магнітосфери Землі [2].

Геомагнітні індукційні струми є струмами, що виникають внаслідок прояву геомагнітних збурень і протікають в протяжних об'єктах земної поверхні Землі. Чинником ГІС є електричне поле, викликане геомагнітними змінами, які є результатом змінних у часі магнітосферно-іоносферних струмів під час несприятливих явищ космічної погоди. Частина досліджень вказує на те, що існує ймовірність технологічних збитків в регіонах середніх і низьких широт, які можуть бути пов'язані з ГІС під час деяких геомагнітних бур протягом останніх сонячних циклів [3]. Внаслідок геомагнітних збурень може виникати електрорушійна сила (ЕРС) між заземленими точками нейтралей трансформаторів магістральних мереж. ЕРС в нейтралі протяжних ліній надвисокої напруги може досягати декількох кіловольт, що призводить до циркуляції по електричних мережах струму, який може досягати значень від десятків до сотень ампер на фазу. Наслідки від подібних струмів в електроенергетичній системі можуть варіюватися від тимчасових проблем з роботою електричного устаткування (наприклад, хибне спрацювання реле) до пошкодження електричних машин і апаратів (наприклад, пошкодження силового трансформатора). Згідно з [3], на тих підстанціях, котрі проводять вимірювання ГІС, самі вимірювання виконуються на з'єднаннях нейтраль-земля трансформаторів з використанням перетворювачів на ефекті Холла. Однак необхідно враховувати характеристики ГІС в лініях електропередавання, підключених до цих трансформаторів. Оскільки геомагнітний індукційний струм має частоту менше 1 герца, то його вплив аналогічний впливу постійного струму [4], тому пряме вимірювання ГІС в лініях електропередавання є неможливим [3].

До теперішнього часу було підтверджені випадки впливу ГС на збої роботи ЕЕС у високширотних зонах, таких як Канада, США, Фінляндія, Швеція, Англія [5,...,9], а також було зафіксовано низку аварійних відключень в низькоширотних зонах: у Китаї, Російській Федерації, Намібії, Новій Зеландії, Південно-Африкнській республіці [10,...,14].

Негативні вплив ГС. Найбільший вплив геомагнітних індукційних струмів буде проявлятися на електричному обладнанні з електромагнітними системами, особливо на роботі силових трансформаторів і автотрансформаторів. Відомо, що для підвищення ефективності роботи магнітна система трансформатора містить сталеве осердя, котре є нелінійним елементом. Зазвичай при розробці трансформаторів мінімізують вплив нелінійності за рахунок мінімізації і розміру сталевго осердя. Тому трансформатори зазвичай розробляються для роботи, в основному, в лінійному діапазоні їх магнітної характеристики.

Під час протікання струмів, спричинених геомагнітними збуреннями, нормальна робоча точка на кривій насичення сталевго осердя зміщується, і трансформатор половину періоду змінного струму працює в нелінійній частині характеристики осердя (рис. 1). Через явне насичення, що відбувається під час такої половини періоду, в трансформаторі виникає досить значний і асиметричний струм намагнічування [15, 16].

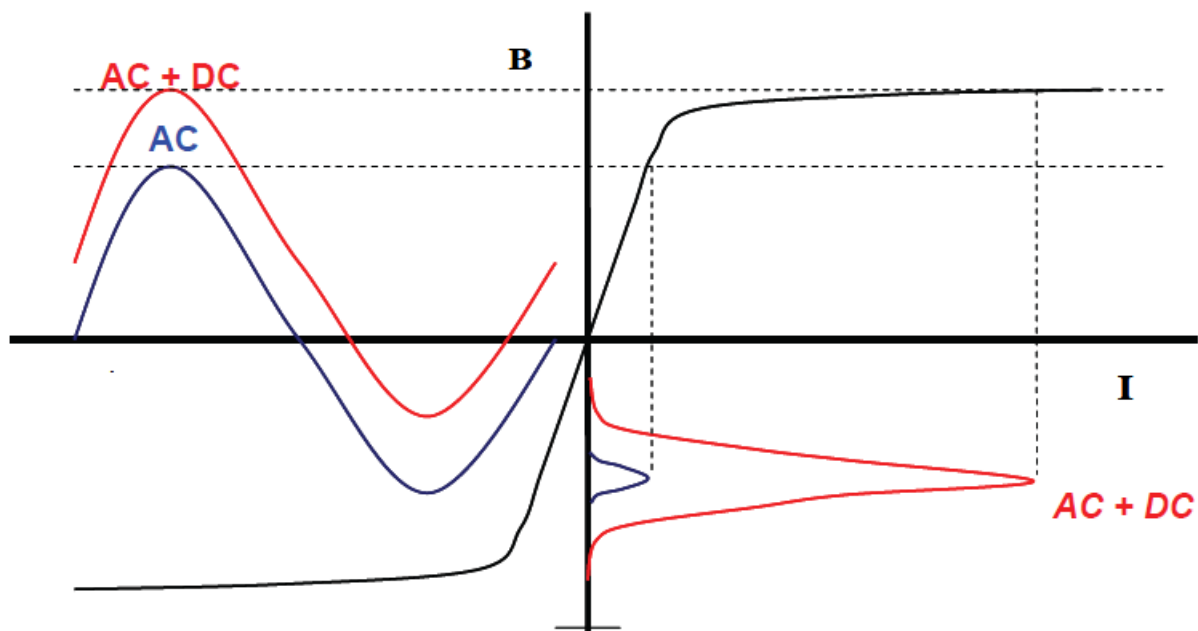


Рисунок 1 – Характеристика намагнічування трансформатора за наявності геомагнітного індукційного струму

Протікання ГС при роботі трансформаторів призводить до того, що останні споживають значно більше реактивної потужності – в моменти насичення осердя виникає істотне зростання струму намагнічування основної частоти, що знижує відповідну реактивну складову напруги і збільшує споживання реактивної потужності від системи, притому спостерігається

лінійна залежність між споживанням реактивної потужності і зростанням ГІС. Таке додаткове споживання реактивної потужності, в свою чергу, може призвести до значного зниження системних напруг і пов'язаних з ними меж стійкості. Додатково, трансформатори під час протікання геомагнітних індукційних струмів стають потужними джерелами вищих гармонік в мережу, які можуть викликати перевантаження батарей ємнісної компенсації і порушення роботи релейного захисту.

Крім того, під час протікання ГІС збільшуються вихрові і циркуляційні струмові втрати в обмотках, а також у конструктивних частинах трансформатора, що в свою чергу призводить до підвищення температури основних елементів трансформатора [15].

Методи і засоби захисту трансформаторів і автотрансформаторів від геомагнітних індукційних струмів. На сьогодні існують різні варіанти захисту трансформаторів і автотрансформаторів. Одним із можливих варіантів зниження геомагнітних струмів є використання пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації (рисунк 2, *а*). Проте основне завдання пристроїв поздовжньої ємнісної компенсації полягає у компенсації індуктивного опору проводів на протяжних лініях електропередавання. Тому, сьогодні розглядаються інші способи боротьби з ГІС – розробка та вдосконалення засобів з обмеження протікання ГІС через нейтралі силових трансформаторів і автотрансформаторів, як зображено на рис. 2, *б*, *в*, *г*.

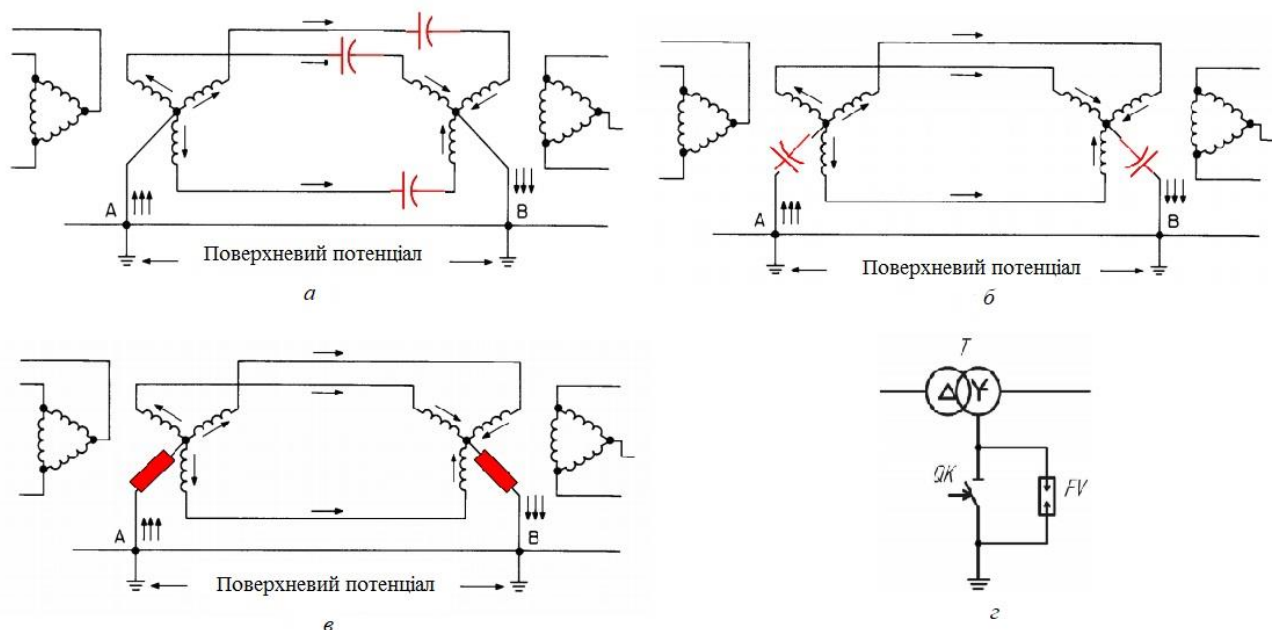


Рисунок 2 – Зниження ГІС в електричних мережах за допомогою: *а* – установок поздовжньої ємнісної компенсації, *б* – ємнісного заземлення нейтралі, *в* – резистивного заземлення нейтралі, *г* – активного заземлення нейтралі через іскровий проміжок.

При резистивному заземленні нейтралі (рисунк 2, *в*) величина ГІС обмежується активним опором заземлюючого резистора.

Наразі існують і інші технічні рішення з компенсації ГІС: розміщення на магнітопроводі трансформатора додаткових обмоток, що компенсують вплив квазіпостійного струму, зашунтуваних спеціальним елементом (СЕ) з низьким опором для змінного струму і високим опором для постійного. Також існують рішення, в яких пропонується підключити компенсаційну обмотку до зовнішнього регульованого джерела постійного струму, що компенсує ГІС [4].

Крім того, провідні компанії, пов'язані з виробництвом електроенергетичного обладнання, приділяють увагу питанням зниження впливу ГІС та розробки спеціальних установок і систем. Однією з таких установок є *Solid Ground*, розроблена фірмою АВВ. Система *SolidGround* автоматично контролює наявність ГІС та індукованих гармонік і, у випадку їх наявності, запускає захисний режим із заземленням нейтралі трансформаторів змінного струму через конденсатори низького опору. Цей захист запобігає виникненню наступних чинників [16]:

- напівхвильовому насиченню трансформатора;
- генерації гармонік на лініях електропередавання;
- термічним пошкодженням трансформаторів і статичних компенсаторів реактивної потужності;
- пошкодженням роторів генераторів.

Висновки. Вплив геомагнітних збурень і, відповідно, геомагнітних індукційних струмів на режим роботи ЕЕС має значний характер: від неправильного спрацювання релейного захисту і автоматики до відключення і виходу з ладу силового електрообладнання.

Для зменшення впливу від протікання геомагнітних індукційних струмів необхідно використовувати спеціальні установи і технічні рішення заземлення нейтралей трансформаторів. Основна проблема, пов'язана з електроустановками захисту від ГІС, полягає в тому, що за відсутності ГІС такі установки не повинні впливати на нормальний режим роботи трансформаторів та електричної мережі в цілому, тобто не повинні знижувати ефективність заземлення нейтралі. Наразі провідними фірмами розробляються та впроваджуються спеціальні системи протидії геомагнітним індукційним струмам.

Перелік посилань

1. Кирик В. В. Аналіз аварійних вимикань магістральних ліній електропередавання / В. В. Кирик, Б. О. Жук.– Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: електротехніка і енергетика.–2018.– №1(19) – 2(20).– с.40-46
2. Zois I.P. Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid [Електронний ресурс] / Ioannis Panayiotis Zois // J. Space Weather Space Clim. 3 (2013) A32 – Режим доступу: http://www.swsc-journal.org/articles/swsc/full_html/2013/01/swsc120058/swsc120058.html
3. Matandirotya, E. (2016). Measurement and modelling of geomagnetically induced currents (GIC) in power lines . (Thesis). Cape Peninsula University of Technology. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://etd.cput.ac.za/handle/20.500.11838/2459>
4. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса – М. : Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с

5. Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface, // *Adv. Space Res*, vol. 22, no. 1, pp. 17–27, 1998.
6. Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impact on power systems. // *IEEE Power Eng. Rev.*, — May 1996. — vol. 16, no. 5, — P. 5–8.
7. Pirjola, R. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Advances in Space Research*, — Vol.36, No.12, doi: 10.1016/j.asr.2003.04.074, — 2005. — P. 2231—2240.
8. Pulkkinen A., Limdahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storms of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high voltage power transmission system // *AGU Space Weather Journal*. — 2005. — V.3, — P. 19.
9. Koen J., Gaunt T. Geomagnetically induced current in the Southern African electricity transmission network, // *Proc. IEEE Bologna PowerTech Conf.*, 2003, —vol. 1, — P. 23–26.
10. Pinto L.M.V.G., Szczupak J., Drummond M.A., Macedo L.H. A new threat to power systems security. // *Proc. IEEE/Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf. Expo. Latin America*, — 2004, — P. 776–781.
11. Kappenman J.G. Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations. // *SpaceWeather*, — 2003. — vol. 1, 1016, — P. 16.
12. Trivedi N.B., Vitorello H., Kabata W., Dutra S.L.G., Padilha A.L., Bologna M.S., de Pódua M.B., Soares A.P., Luz G.S., Pinto F.d.A., Pirjola R., Viljanen A. Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study // *Space Weather*, — 2007. — vol. 5, — P. 10.
13. Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic eld disturbances and power grid impacts associated with the violent sunearth connection events of 29 31October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms. // *Space Weather*/— 2005. —vol. 3, — P. 21.
14. Beland J., Small K. *Space Weather Effects on Power Transmission Systems* Space Weather Effects on Power Transmission: The Cases of Hydro-Quebec and Transpower New Zealand Ltd., Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, — 2004. — P. 287–299
15. IEEE Power and Energy Society Technical Council Task Force on Geomagnetic Disturbances (2013). *Geomagnetic Disturbances – Their Impact on the Power Grid*. *IEEE power & energy magazine* 11(4), 71-78
16. *Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System*. NERC Special Reliability Assessment. / GMDTF Interim Report, 2012. 182 p. Электронный ресурс. Режим доступа:
https://files.givewell.org/files/shallow/geomagnetic/Geomagnetic_Disturbance_Task_Force_2012.pdf
17. ABB. SolidGround. GIC grid stability and harmonics mitigation system Электронный ресурс. Режим доступа:
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2GNM110098&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>