

РАСЧЕТ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

© 2012 В.В. Вахнина, Д.А. Кретов, В.А. Кузнецов

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 10.09.2012

Разработан метод расчета геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения. Выполнена оценка величины геоиндуцированных токов в линиях электропередач класса напряжений 110–330 кВ при разных уровнях напряженности геоэлектрического поля. Показано, что величина геоиндуцированных токов в системах электроснабжения может быть соизмерима с рабочими токами линий электропередач.

Ключевые слова: геоиндуцированные токи; геомагнитные бури; высоковольтная линия электропередач.

Геомагнитные бури (ГМБ) возбуждают вариации геомагнитного поля Земли, что индуцирует поверхностные потенциалы Земли – геоэлектрические поля с амплитудой $E = 6-10$ В/км, а отдельных случаях до 15 В/км, частотой $f = 0,1 - 0,001$ Гц, которые в протяженных заземленных системах создают геоиндуцированные токи (ГИТ). Поскольку ГИТ не трансформируются силовыми трансформаторами (СТ) их называют квазипостоянными токами.

При выполнении системы электроснабжения (СЭС) с эффективно или глухозаземленными нейтралью силовых трансформаторов и, если при этом, точек заземления не менее двух, то в этих случаях в длинных линиях электропередач (ЛЭП) протекают ГИТ до нескольких десятков и даже сотен ампер на фазу, влияя на работу систем электроснабжения [1].

Примером воздействия ГИТ на систему электроснабжения является системная авария во время геомагнитной бури 13 марта 1989 года. Во время этой ГМБ в электроэнергетической системе восточного побережья США вышли из строя автотрансформатор 500/138 кВ мощностью 350 МВА и группы однофазных повышающих трансформаторов 18/500 кВ. В автотрансформаторе наблюдались: перегрев, вызвавший изменение окраски бака в нескольких местах, увеличение содержания гармоник в токе обмотки низкого напряжения с 2 до 9% и усиление шума, создаваемого автотрансформатором, на 10-15 дБ [2].

Вахнина Вера Васильевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехника». E-mail: V.Vahkina@tltu.ru

Кретов Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника».

E-mail: Dmitry.kretov@gmail.com

Кузнецов Виталий Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника».

E-mail: V.A.Kuznetsov@yandex.ru

Следует отметить, что современные СЭС более восприимчивы к геомагнитным бурям, чем их локальные предшественники из-за больших географических площадей, которые они занимают, а также из-за их взаимосвязанности и насыщенности электронным оборудованием. В связи с этим актуальным является разработка методов расчета ГИТ для оценки уязвимости современных систем электроснабжения при геомагнитных бурях.

Оценим амплитуды ГИТ в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях. На рис. 1 представлен прямолинейный участок линии электропередач ЛЭП длиной l между двумя трансформаторными подстанциями. Трансформаторы Т1 и Т2 подстанций имеют заземления в точках А и В. Возникающая между этими точками ЭДС $E = E_x \cdot l$, обусловленная напряженностью геоэлектрического поля, генерирует геоиндуцированные токи.

Геоэлектрическое поле рассчитывается исходя из наблюдаемых вариаций изменений геомагнитного поля и геофизических данных о глубинной электропроводности данного региона (модели проводимости). Для расчета используется стандартная методика перехода от временных рядов к Фурье – образам (частотно-фазовым характеристикам) [3]:

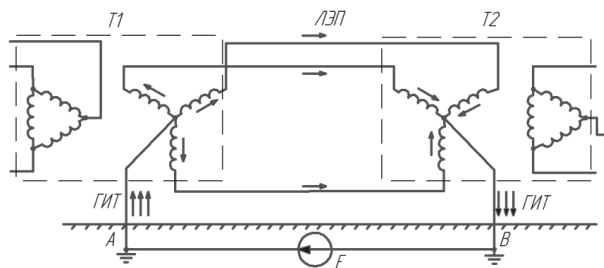


Рис. 1. Протекание ГИТ по обмоткам высокого напряжения трансформаторов и высоковольтной линии электропередач СЭС

$$E_x(\omega) = \frac{z(\omega) \cdot B_y(\omega)}{\mu_0}, \quad (1)$$

где $B_y(\omega)$ – напряженность геомагнитного поля; $z(\omega)$ – импеданс цепи протекания ГИТ; μ_0 – магнитная постоянная; ω – угловая частота.

Электромагнитные и геометрические параметры проводников высоковольтных линий электропередач могут сильно различаться, что оказывает влияние на частотные характеристики результирующих электрических полей и ГИТ. Поэтому расчет ГИТ по геоэлектрическому полю зависит от конкретной конфигурации СЭС.

Для периодов более 1 – 10 с (т.е. частоты ниже 1 – 0,1 Гц) амплитуда и фаза электрического поля в проводниках совпадает с характеристиками невозмущенного электрического поля, что позволяет применять законы линейных электрических цепей с активным сопротивлением, где источником является рассчитанное геоэлектрическое поле в данный момент времени, и использовать модели с дискретным заземлением [3].

Эквивалентная схема замещения представлена на рис. 2,а. Здесь $R_{T1A}, R_{T1B}, R_{T1C}$ – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) обмоток высокого напряжения трехфазного повышающего трансформатора Т1; $R_{ЛА}, R_{ЛВ}, R_{ЛС}$ – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) фаз воздушной ЛЭП; $R_{T2A}, R_{T2B}, R_{T2C}$ – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) обмоток высокого напряжения трехфазного понижающего трансформатора Т2; R_{3y} – сопротивления заземляющих устройств; R_3 – активное сопротивление грунта.

Активные сопротивления фаз воздушной ЛЭП определяются как

$$\begin{aligned} R_{ЛА} &= R_{ОА} \cdot l; \\ R_{ЛВ} &= R_{ОВ} \cdot l; \\ R_{ЛС} &= R_{ОС} \cdot l, \end{aligned} \quad (2)$$

где $R_{ОА}, R_{ОВ}, R_{ОС}$ – активные погонные сопротивления фаз ЛЭП.

Активное сопротивление грунта:

$$R_3 = R_{30} \cdot l, \quad (3)$$

где R_{30} – активное погонное (удельное) сопротивление грунта.

Полную схему замещения (рис. 2,а) необходимо использовать для расчета постоянных составляющих токов фазных обмоток трансформаторов Т1, Т2 и фаз ЛЭП в условиях заметной несимметрии (более 10-15%) активных сопротивлений обмоток ВН и фазных проводов линии электропередачи. Однако специальные конструктивные мероприятия, такие как транспозиция проводов, обеспечивают фазную симметрию активных сопротивлений. В этих условиях полная схема заме-

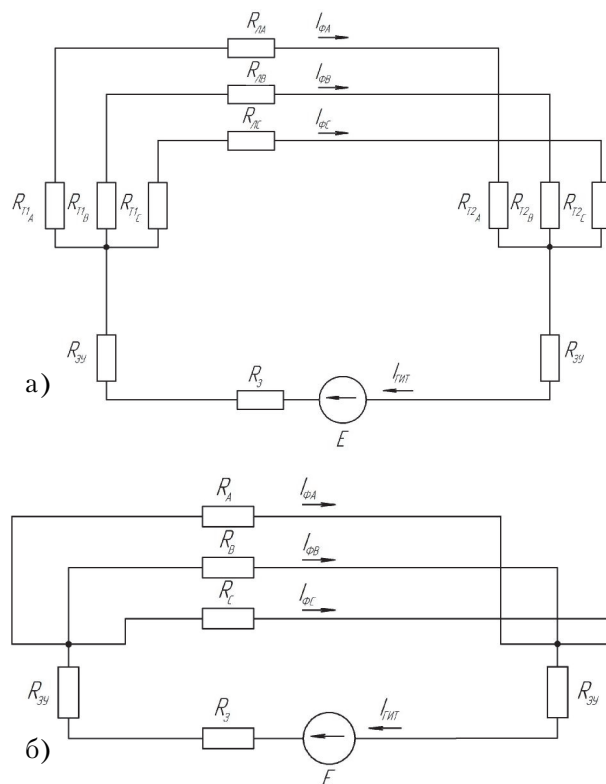


Рис. 2. Схема замещения участка СЭС при протекании ГИТ

щения существенно упрощается к виду, изображенному на рис. 2,б, где

$$\begin{aligned} R_A &= R_{T1A} + R_{ЛА} + R_{T2A}; \\ R_B &= R_{T1B} + R_{ЛВ} + R_{T2B}; \\ R_C &= R_{T1C} + R_{ЛС} + R_{T2C}. \end{aligned} \quad (4)$$

Суммарное сопротивление для контура протекания геоиндуцированных токов:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_A + R_B + R_C}{3} + 2R_{3y} + R_3. \quad (5)$$

Используя эквивалентную схему, значение ГИТ в нейтрали силового трансформатора можно определить как

$$I_{ГИТ} = \frac{E_x \cdot l}{R_{\Sigma}}. \quad (6)$$

Если ЛЭП состоит из нескольких участков, то

$$I_{ГИТ} = \frac{\int \vec{E}_x(l) dl}{R_{\Sigma}}, \quad (7)$$

где $\vec{E}_x(l)$ – напряженность геоэлектрического поля, наведенная в грунте на участке dl .

Учитывая, что ЛЭП состоит из прямолинейных участков, формулу (7) можно записать в виде:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cos \alpha_i l_i}{R_{\Sigma}}, \quad (8)$$

Таблица 1. Характеристики высоковольтных ЛЭП и геоиндуцированные токи при напряженностях геоэлектрического поля $E=3$ В/км; $E=6$ В/км; $E=10$ В/км; $E=15$ В/км (передаваемая мощность 125000 кВА)

Классы ЛЭП, кВ	Марка провода	Длина ЛЭП, км	Рабочий ток в фазе (А)	ГИТ в фазе I_{ϕ} (А) при			
				$E=3$ В/км	$E=6$ В/км	$E=10$ В/км	$E=15$ В/км
110	АС-185	25-80	627,6	15,5-17,4	30,9-34,7	51,7-57,9	77,5-86,8
220	АС-400	100-400	313,8	30,6-37,2	61,3-74,3	102,2-123,9	153,2-185,8
330	АС-240	130-700	209,2	33,7-46,5	67,5-92,9	112,4-154,9	168,6-232,3

где E_i – значение напряженности геоэлектрического поля на i -ом прямолинейном участке ЛЭП; α_i – угол ориентации i -ого участка ЛЭП относительно направления силовой линии геоэлектрического поля; l_i – длина i ого прямолинейного участка ЛЭП; n – количество прямолинейных участков ЛЭП.

Таким образом, величина геоиндуцированных токов, наведенных в высоковольтных линиях электропередач при геомагнитных бурях, определяется следующими основными параметрами:

1. скоростью изменения геомагнитного поля при геомагнитной буре и размерами области распространения геомагнитного поля;

2. сопротивлением грунта, сопротивлением заземления;

3. длиной и связанностью линий электропередач;

4. географическим расположением точек, в которых СЭС контактирует с земной поверхностью.

В табл. 1 приведены расчетные значения геоиндуцированных токов в фазах ЛЭП для различных классов напряжений при геомагнитной буре с напряженностью геоэлектрического поля: $E=1$ В/км; 3 В/км; 15 В/км. В расчетах принято $R_{3y} = 0,5$ Ом, $R_{30} = 0,048$ Ом/км [4].

Как видно из табл.1, с увеличением класса напряжения линии электропередачи, напряженности геоэлектрического поля геомагнитных бурь значения геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач растут. Данное обстоятельство связано с увеличением длин и уменьшением погонного сопротивления высоковольт-

ных ЛЭП. Расчетные значения ГИТ при сильных геомагнитных бурях в линиях электропередач могут быть сопоставимы с их рабочими токами в фазе и, очевидно, привести к насыщению магнитной системы силовых трансформаторов, срабатыванию систем релейной защиты и автоматики и отключению линий электропередач.

Разработанный метод позволяет рассчитывать величины геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач в зависимости от конфигурации и параметров схемы замещения системы электроснабжения, а также углов ориентации участков ЛЭП относительно направления силовых линий геоэлектрического поля. Оценка величин ГИТ в линиях электропередач разного класса напряжений позволит исследовать устойчивость систем электроснабжения при геомагнитных бурях различной интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beamish D., Clark T.D.G., Clarke E., Thomson A.W.* Geomagnetically induced currents in the UK: geomagnetic variations and surface electric field // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. № 64. pp. 1779-1792.
2. *Kappenman J.G.* Geomagnetic storms and Their Impact on Power Systems// *IEEE Power Engineering Review.* May 1996. Pp. 5-8.
3. *Pirjola R.* Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems// *Surveys in geophysics.* 2002. № 23. Pp. 71 - 90.
4. *Карякин P.H.* Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергосервис, 2006. 520 с.

CALCULATION OF GEO INDUCED CURRENTS IN HIGH-VOLTAGE POWER LINES OF ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS AT GEOMAGNETIC STORMS

© 2012 V.V. Vahnina, D.A. Kretov, V.A. Kuznetsov

Togliatti State University

A method for calculating geo induced currents at geomagnetic storms in the high-voltage power lines of electricity supply systems was developed. The estimation of the value geo induced currents in power lines voltage class 110 - 330 kW at different levels of intensity of geoelectrical field. Showing, that the magnitude of geo induced currents in power systems can be comparable with operating currents of high-voltage power lines.

Keywords: geo induced currents, geomagnetic storms, high-voltage power lines.

Vera Vahnina, Candidate of Technics, Associate Professor, Head at the Power and Electrical Engineering Department.

E-mail: V.Vahnina@tltu.ru

Dmitriy Kretov, Graduate Student at the Power and Electrical Engineering Department. E-mail: dmitry.kretov@gmail.com

Vitaly Kuznetsov, Graduate Student at the Power and Electrical Engineering Department. E-mail: V.A.Kuznetsov@yandex.ru