

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ПРИРОДНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

В.В. Вахнина¹, А.А. Кувшинов², О.В. Самолина³, М.В. Дубинин⁴

Возникновение аварийных ситуаций в электроэнергетических системах может быть обусловлено как техногенными, так и различными природными факторами. В работе разработана методика оценки уязвимости электроэнергетических систем к природным воздействиям. Методика основывается на построении пространственной модели электроэнергетической системы, которая учитывает взаимное пространственное расположение трансформаторных подстанций в полярной системе координат. Получено, что в общем случае степень уязвимости электрической сети к геомагнитным возмущениям может характеризовать относительная величина электрической длины сети L^* , которая определяется суммарной длиной проекций трасс воздушных линий на направление геоэлектрического поля. Таким образом, предложен количественный критерий степени уязвимости электроэнергетических систем к геомагнитным возмущениям по характеристикам пространственного расположения трансформаторных подстанций и воздушных линий

Ключевые слова: электроэнергетические системы, аварийные ситуации, разность потенциалов, пространственная модель, уязвимость системы.

ВВЕДЕНИЕ

Аварийные ситуации в электроэнергетических системах (ЭЭС) непредсказуемы и могут быть вызваны многими факторами: отказом оборудования, неправильными и несогласованными действиями обслуживающего персонала, а также различными природными (геомагнитные бури) и техногенными воздействиями. Во время геомагнитных бурь (ГМБ) между заземленными нейтральными силовых трансформаторов (СТ) ЭЭС возникает ЭДС. На протяженных линиях электропередач (ЛЭП) ЭДС может достигать нескольких киловольт, и в ЛЭП появляется квазипостоянный ток, который принято называть геоиндуцированным током (ГИТ). Величина ГИТ определяется топологией электрической сети, географическим расположением трансформаторных подстанций, ориентацией вектора напряженности геоэлектрического поля у поверхности земли относительно трасс воздушных линий и может превышать номинальный ток силовых трансформаторов.

Частота ГИТ не превышает 0,1 Гц и во много раз меньше номинальной частоты (50 Гц) напряжения электрической сети. Основное воздействие ГИТ на электрическую сеть заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов, приводящее к многократному возрастанию несинусоидальных токов намагничивания. Это одинаково опасно как для силовых трансформаторов, поскольку возникает дополнительный нагрев обмоток, магнитопровода, масла, конструктивных элементов, так и для режима электрической сети, поскольку увеличивается потребление реактивной мощности, снижается пропускная способность, ухудшается качество электроэнергии.

Следует отметить, что экстремальные геомагнитные бури имеют повторяемость около одного раза в год, охватывают территории до десятков тысяч километров, инициируют критические режимы функционирования ЭЭС, что приводит к системным авариям и, как следствие, к чрезвычайным ситуациям техногенного характера. Из-за геомагнитных бурь были отключения или выходы из строя ЭЭС: в Финляндии (1982, 1986 г.г.); Швеции (1982, 1986, 1991, 2003 г.г.); США и Канаде (1958, 1980, 1989, 1991, 1994, 2003 г.г.); Англии (1989 г.); Дании (2003 г.), ЮАР (2003 г.). Самые серьезные повреждения ЭЭС были вызваны геомагнитной бурей 13 – 14 марта 1989 г. В результате геомагнитной бури произошло полное отключение ЭЭС Hydro-Quebec; повреждение двух автотрансформаторов 400/275 кВ в Южной Англии; отключение линии электропередачи (ЛЭП) 400 кВ/400 МВт в Швеции; выход из строя генератора и силовых трансформаторов на АЭС Салем Юнит в Нью-Джерси (США) из-за перегрева паразитными магнитными потоками. В результате аварии в ЭЭС Hydro-Quebec 6 миллионов человек и большая часть промышленности провинции Quebec Канады остались без электричества.

¹Вахнина Вера Васильевна, заведующий кафедрой. «Тольяттинский государственный университет», тел. 8(8482)546311, e-mail: VVVahkina@yandex.ru

²Кувшинов Алексей Алексеевич, профессор. «Тольяттинский государственный университет», тел. 8(8482)539282, e-mail: EiE@tltsu.ru

³Самолина Ольга Владимировна, старший преподаватель. «Тольяттинский государственный университет», тел. 8(8482)539282, e-mail: samolina@tltsu.ru

⁴Дубинин Михаил Владимирович, аспирант. «Тольяттинский государственный университет», тел. 8(8482)539282, e-mail: EiE@tltsu.ru

Территория России находится в средних и высоких широтах и подвержена воздействию геомагнитных бурь. Парковый ресурс действующего электрооборудования в российской энергетике выработан примерно на 80%, оборудование электрических станций и линий электропередач изношено примерно на 50%, что приводит к росту аварийности даже без учета воздействия геомагнитных бурь.

До настоящего времени вопросу влияния ГМБ на функционирование силовых трансформаторов ЭЭС с разработкой мер по их защите не уделялось должного внимания. Отсутствуют рекомендации по повышению надежности их функционирования в ЭЭС при геомагнитных бурях, как, например, в Document C-15 [1] и Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template [2].

Поэтому актуальной является задача адекватной оценки степени опасности ГМБ различной интенсивности для электрооборудования и режима конкретной ЭЭС, которая решается в данной работе.

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Известные подходы к расчету ГИТ используют в качестве исходных данных параметры горизонтальной компоненты геоэлектрического поля на поверхности земли [3-5], которую считают неизменной по величине и направлению в пределах области, занимаемой рассматриваемой ЭЭС, т.е. геоэлектрическое поле предполагается потенциальным. Это позволяет определять разность потенциалов на поверхности земли между заземляющими устройствами двух подстанций, связанных воздушной линией (ВЛ), с помощью интегрального соотношения:

$$U = \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_l |\mathbf{E}| \cdot \cos \alpha \cdot dl, \quad (1)$$

где \mathbf{E} - вектор напряженности геоэлектрического поля; $|\mathbf{E}|$ - модуль вектора напряженности геоэлектрического поля; $d\mathbf{l}$ - вектор, равный по величине элементу пути dl и направленный по касательной к выбранному пути интегрирования l ; α – угол между векторами \mathbf{E} и $d\mathbf{l}$.

Величина разности потенциалов не зависит, как следует из принятого допущения, от выбора конкретного пути интегрирования, который в частности может совпадать с трассой ВЛ. Поскольку трасса ВЛ состоит из прямолинейных участков, то с учетом $|\mathbf{E}| = \text{const}$ целесообразно в выражении (1) заменить интегрирование суммированием и записать [6]:

$$U = |\mathbf{E}| \sum_{j=1}^J l_j \cdot \cos \alpha_j, \quad (2)$$

где l_j - длина j -го участка ВЛ; α_j - угол ориентации j -го участка ВЛ относительно вектора напряженности геоэлектрического поля; J - количество прямолинейных участков.

Опыт наблюдений показывает, что типичные диапазоны значений напряженности и частоты геоэлектрического поля на поверхности земли составляют (1÷20) В/км и (0,001÷0,1) Гц соответственно, хотя зарегистрирована и экстремально высокая величина напряженности 50 В/км [7]. Физическая картина растекания ГИТ от заземляющих устройств аналогична растеканию постоянного тока в земле. Постоянный ток растекается во все стороны и проникает глубоко в землю, в связи с чем плотность постоянного тока в земле быстро убывает по мере удаления от заземляющего устройства, примерно обратно пропорционально квадрату расстояния [8]. Это позволяет в расчетах ГИТ пренебрегать сопротивлением земли и учитывать только сопротивление растекания заземляющих устройств.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭЭС РАДИАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ

В общем случае ЭЭС радиальной топологии образуется воздушными линиями $ВЛ_1, \dots, ВЛ_n$, которые связывают центр питания с трансформатором T и распределительные трансформаторы T_1, \dots, T_n , как показано на рис. 1.

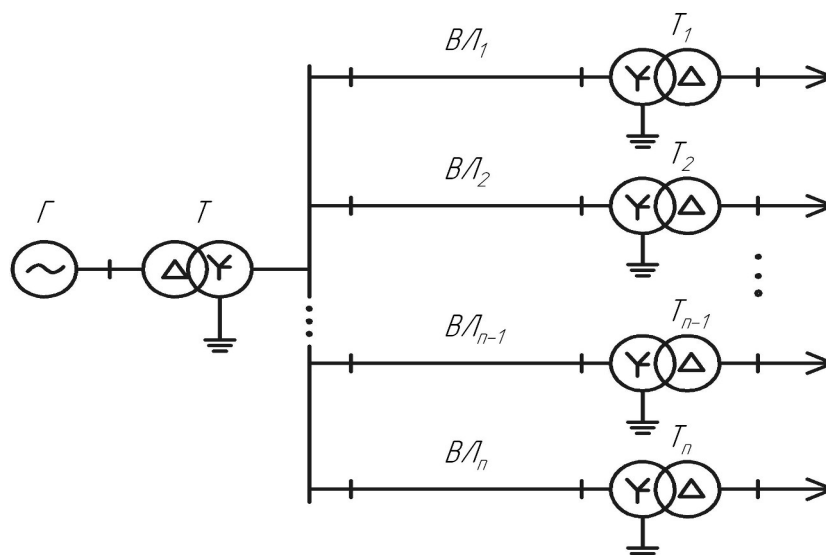


Рис. 1. Электрическая схема радиальной сети

В сетях 110 кВ и выше обмотки высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов имеют глухо заземленную нейтраль. В результате в радиальной сети образуется «n» контуров, в которых в период ГМБ под воздействием разности потенциалов между заземляющими устройствами центрального T и распределительных T_1, \dots, T_n силовых трансформаторов могут протекать ГИТ, ограниченные только активными сопротивлениями фазных проводов ВЛ, обмоток ВН и заземляющих устройств.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЭС

Для оценки величины разности потенциалов между заземляющими устройствами необходимо учитывать взаимное пространственное расположение трансформаторных подстанций. Наиболее просто это сделать в полярной системе координат, которая должна задаваться:

полюсом O , совмещаемым с одним из заземляющих устройств рассматриваемой электрической сети. В качестве полюса целесообразно выбрать заземляющее устройство центрального трансформатора T , потенциал которого принимается равным нулю;

полярной осью, совмещаемой либо с направлением вектора напряженности геоэлектрического поля, либо с одним из географических направлений, либо с трассой наиболее протяженной ВЛ.

Если полярную ось совместить с направлением вектора E напряженности геоэлектрического поля, то взаимное расположение подстанций и соответствующих заземляющих устройств рассматриваемой электрической сети изобразится в виде карты, показанной на рис. 2.

Потенциал заземляющего устройства трансформаторной подстанции T_i будет определяться величиной полярного радиуса (предварительно можно принять равным физической длине соответствующей ВЛ $_i$) и полярного угла α_i , который отсчитывается от полярной оси против вращения часовой стрелки. Тогда величина разности потенциалов будет определяться выражением:

$$\varphi_i - \varphi_0 = |\mathbf{E}| \cdot l_i \cdot \cos \alpha_i, \tag{3}$$

где φ_i – потенциал заземляющего устройства распределительного трансформатора T_i ; $\varphi_0 = 0$ – потенциал заземляющего устройства центрального трансформатора T .

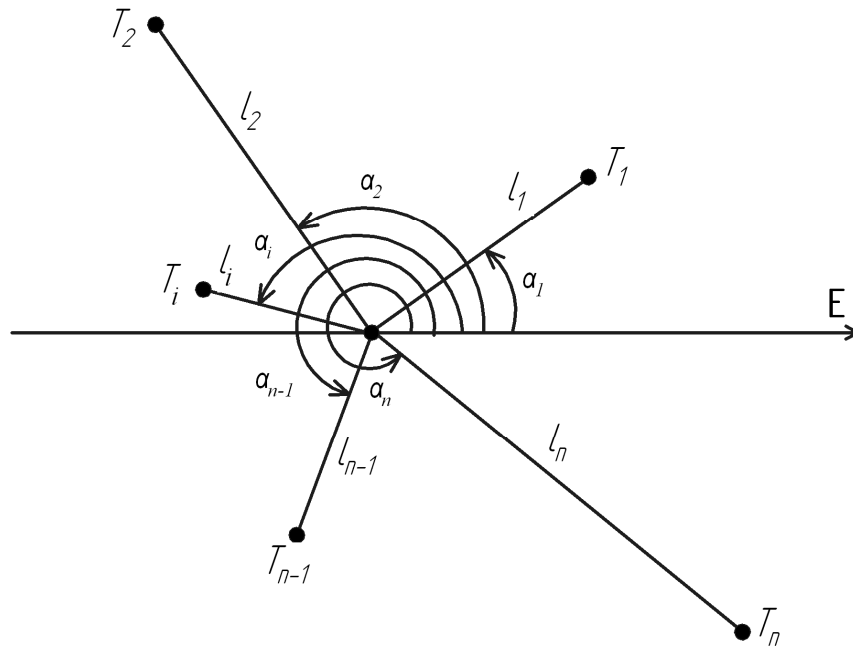


Рис. 2. Карта взаимного пространственного расположения силовых трансформаторов T_1, \dots, T_n радиальной сети в полярной системе координат

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ КРИТЕРИЙ УЯЗВИМОСТИ ЭЭС

Интересно отметить следующую особенность рассматриваемой топологии электрической сети. Если пространственное расположение трансформаторных подстанций радиальной сети таково, что:

$$l_1 \cdot \cos \alpha_1 = l_2 \cdot \cos \alpha_2 = \dots = l_n \cdot \cos \alpha_n, \quad (4)$$

то, как видно из выражения (3), будут равны между собой и потенциалы заземляющих устройств всех распределительных трансформаторов.

Тогда при разземлении нейтрали центрального трансформатора T не будут протекать ГИТ и в нейтралях всех распределительных трансформаторов T_1, \dots, T_n . Таким образом, для защиты всех силовых трансформаторов такой радиальной сети от воздействия ГИТ достаточно разземлить нейтраль только одного силового трансформатора в центре питания.

Если условие (4) не выполняется, то разземление нейтрали наиболее мощного центрального силового трансформатора T полностью защищает последний от воздействия ГИТ и одновременно снижает уровень ГИТ в нейтралях распределительных силовых трансформаторов T_1, \dots, T_n . Уменьшение ГИТ в радиальной сети будет тем заметней, чем полнее характеристики пространственного расположения распределительных трансформаторов T_1, \dots, T_n отвечают условию (4).

В общем случае, степень уязвимости электрической сети к воздействию геомагнитных возмущений может характеризовать относительная величина электрической длины сети:

$$L_{\odot}^* = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \cdot \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (5)$$

которая определяется суммарной длиной проекций трасс воздушных линий на направление геоэлектрического поля и может изменяться в диапазоне $-1 \leq L_{\odot}^* \leq 1$. При $L_{\odot}^* = 0$ электрическая сеть не

подвержена воздействию геомагнитных возмущений, а при $L_3^* = 1$ или $L_3^* = -1$ напротив наиболее уязвима.

В последнем случае актуальной становится проблема защиты силовых трансформаторов от воздействия ГИТ, которая должна решаться без нарушения электроснабжения потребителей. В зарубежной практике для защиты силовых трансформаторов используют включение в нейтраль обмоток высокого напряжения конденсаторной батареи. Для этого необходимо дополнительное коммутационное оборудование, а мощность конденсаторной батареи может достигать 30% номинальной мощности защищаемого силового трансформатора. Такая защита сложна для практической реализации, а экономически очень затратна, что препятствует массовому использованию в электрических сетях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Степень уязвимости электрической сети к геомагнитным бурям количественно оценивается отношением алгебраической суммы проекций трасс воздушных линий между силовыми трансформаторами на направление геоэлектрического поля к сумме геометрических длин воздушных линий. Для уменьшения степени уязвимости ЭЭС к геомагнитным бурям необходимо на основе комплексного исследования механизмов возникновения и распространения ГИТ в сложных электрических сетях различной конфигурации решать проблему создания сравнительно дешевых средств защиты, пригодных для массового применения и не оказывающих негативное влияние на режимы работы силовых трансформаторов.

THE METHOD OF RAPID ASSESSMENT OF VULNERABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS TO NATURAL INFLUENCE BASED ON SPATIAL MODELS

V.V.Vakhnina, A.A.Kuvshinov, O.V.Samolina, M.V.dubinina

Emergencies in electric power systems can be caused by both man-made and various natural factors. The article presents the method, which was developed for a vulnerability assessment of electric power systems to natural influences. The method is based on the construction of a spatial model of electric power system that takes into account the relative spatial arrangement of substations in the polar coordinate system. It was found that, in general, the vulnerability of the power grid to geomagnetic disturbances could be characterized by the relative magnitude of the electrical network length, which is determined by the total length of the power lines projection on the direction of the geoelectric field. Thus suggested the quantitative criterion of degree of vulnerability of electric power system to the geomagnetic storm by characteristics of spatial arrangement of substations and power lines

Keywords: Electric power system, emergencies, the difference of potential, spatial model, vulnerability of a system

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.npcc.org/Standards/Procedures/c-15.pdf>
2. http://www.nerc.com/docs/pc/gmdtf/Template_TOP.pdf
3. Wik M., Viljanen A., Pirjola R., Pulkkinen A., Wintoft P., Lundsted H. Calculation of geomagnetically induced currents in 400 kV power grid in southern Sweden. - Space weather, vol.6, S07005, doi: 10.1029/2007 SW000343, 2008.
4. Boteler D. Modelling of geomagnetically induced current. - Final Report, Geological Survey of Canada and Ontario Hydro Collaborative Research Project, august 1998.
5. Pirjola R. Effect of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems. -Earth Planet Space, 2008, 60, p. 743 – 751.
6. Вахнина В.В., Кретов Д.А., Кузнецов В.А. Расчет геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях. - Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, 2012, № 6, с. 244-246.
7. Касинский В.В., Птицына Н.Г., Ляхов Н.Н., Тясто М.И., Виллорези Дж., Ючки Н. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики. - Геомагнетизм и аэрномия, 2007, том 47, №5, с. 714 - 718.
8. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. - Л.: Энергия, 1973, 303 с.