

Сравнительный анализ способов защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения от воздействия геоиндуцированных токов

Кувшинов А. А., Вахнина В. В., доктора техн. наук,
Черненко А. Н., канд. техн. наук, Зюзин М. О., инж.

Тольяттинский государственный университет



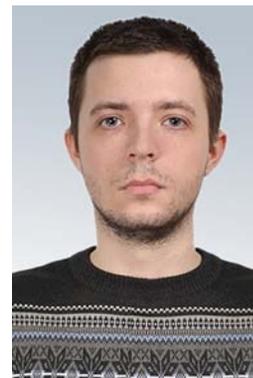
Кувшинов А. А.



Вахнина В. В.



Черненко А. Н.



Зюзин М. О.

Дан анализ резистивного, емкостного и активного способов заземления нейтралей для защиты силовых трансформаторов от воздействия геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях. Рассмотрены схемные решения, оценены достоинства и недостатки указанных способов заземления нейтралей.

Ключевые слова: силовой трансформатор, система электроснабжения, геоиндуцированный ток, резистивное заземление нейтрали, емкостное заземление нейтрали, активное заземление нейтрали.

Возмущения геомагнитного поля в периоды геомагнитных бурь индуцируют на поверхности Земли квазипостоянные геоэлектрические поля, вследствие чего возникает разность потенциалов между заземлителями подстанций и электростанций [1]. В результате в системах электроснабжения (СЭС) напряжением 110 кВ и выше с глухозаземленными нейтралью силовых трансформаторов (СТ) протекают геоиндуцированные токи (ГИТ) в замкнутых контурах, образованных заземленными обмотками высокого напряжения (ВН) указанных трансформаторов и фазными проводниками воздушных линий (ВЛ) [2]. Основное воздействие ГИТ заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов, что обуславливает многократное возрастание несинусоидальных токов намагничивания, которые также циркулируют в СЭС [3]. Это приводит к нарушению синусоидальности напряжения, увеличению потребления реактивной мощности, снижению надежности электроснабжения потребителей [4].

В России до настоящего времени вопросам влияния геомагнитных бурь на функционирование СТ систем электроснабжения и

разработки мер по их защите не уделялось должного внимания. В частности, отсутствуют рекомендации по повышению надежности их функционирования при геомагнитных бурях, например, такие, как в [5, 6]. Как видно из отчетов ОАО «ФСК ЕЭС», предположительно 27 % повреждений воздушных линий, СТ и их отключений «вследствие невыясненных причин» могут происходить из-за протекания геоиндуцированных токов. Однако это не подтверждается актами и отчетами по технологическим нарушениям, поскольку в списке классификационных признаков, включенных в «Инструкцию по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей», и в перечне причин возникновения аварий, указанных в «Правилах расследования аварий в электроэнергетике», отсутствует именно влияние на режимы работы СЭС геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях.

Решение актуальной задачи защиты СТ от воздействия геоиндуцированных токов обеспечивает функционирование систем электроснабжения в периоды геомагнитных бурь без

снижения пропускной способности. В данной статье дается сравнительная характеристика эффективности различных способов защиты СТ от воздействия ГИТ без отключения от систем электроснабжения и соответственно без прекращения электроснабжения потребителей.

Резистивное заземление нейтралей силовых трансформаторов и автотрансформаторов используется для ограничения уровней токов однофазных КЗ наряду с такими мерами, как частичное разземление нейтралей (обычно допустимо только для трансформаторов 110 кВ) и включение в нейтрали токоограничивающих реакторов [7]. В любом случае не должно нарушаться условие эффективности заземления нейтрали, которое определяется значением коэффициента заземления

$$K_3 = \frac{U_{\text{ф.з.}}}{U_{\text{ном}}} \leq 0,8, \quad (1)$$

где $U_{\text{ф.з.}}$ — напряжение на неповрежденной фазе при однофазном КЗ; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение электрической сети.

Условие (1) выполняется при $x_0/x_1 \leq 5$, где x_0 и x_1 — сопротивления нулевой и прямой последовательностей относительно точки КЗ.

В [8] резистивное заземление нейтралей СТ (рис. 1) рассмотрено в качестве способа ограничения ГИТ, протекающего в период геомагнитных бурь по заземленным нейтралям, заземленным обмоткам ВН этих трансформаторов и фазным проводам воздушных линий под воздействием горизонтальной составляющей $E(x, y)$ напряженности геоэлектрического поля у поверхности Земли. Обычно $E(x, y)$ определяется в системе координат X (на север), Y (на восток), Z (к центру Земли) [9].

Значение геоиндуцированного тока ограничивается на уровне, определяемом из выражения

$$I_{\text{ГИТ}} = \frac{E}{r_{T1} + r_{T2} + r_{\text{ВЛ}} + 2R},$$

где $E = E(x, y)l$ — ЭДС, равная разности потенциалов заземляющих устройств силовых трансформаторов $T1$, $T2$, возникающей под воздействием геоэлектрического поля; r_{T1} , r_{T2} , $r_{\text{ВЛ}}$ — активные сопротивления обмоток ВН силовых трансформаторов $T1$, $T2$ и фазных проводов ВЛ соответственно; R — сопротивление заземляющего резистора; l — длина фазного провода воздушной линии.

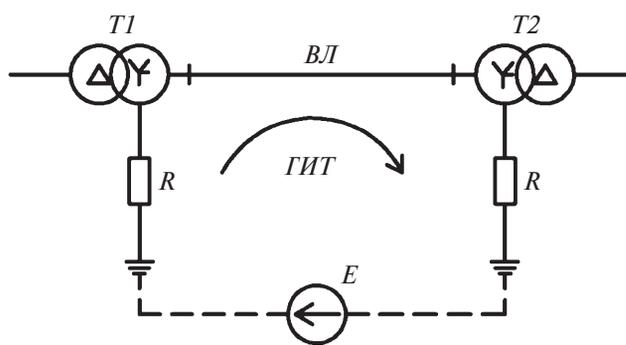


Рис. 1

Используя в качестве базовой величины ток

$$I_6 = \frac{E}{r_{T1} + r_{T2} + r_{\text{ВЛ}}},$$

эффективность резистивного заземления можно оценить по относительному значению ГИТ, определяемому по формуле

$$I_{\text{ГИТ}}^* = \frac{I_{\text{ГИТ}}}{I_6} = \frac{1}{1 + 2R^*}, \quad (2)$$

где $R^* = R/(r_{T1} + r_{T2} + r_{\text{ВЛ}})$.

Как видно, при $R^* \geq (3 \div 4)$ достигается максимальный эффект (более 85 %) по ограничению геоиндуцированных токов с помощью резистивного заземления нейтрали. Например, для сети 220 кВ с воздушной линией длиной 100 км, сечением фазного провода $240 \div 400 \text{ мм}^2$ и силовыми трансформаторами номинальной мощностью $40 - 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ суммарное сопротивление $r_{T1} + r_{T2} + r_{\text{ВЛ}} = 2,53 \div 5,8 \text{ Ом}$, и для снижения геоиндуцированного тока на 80 % необходимо выбрать $R \geq 5 \div 11,6 \text{ Ом}$.

Рекомендуемый в [8] диапазон сопротивлений заземляющего резистора R должен составлять $2,5 \div 7,5 \text{ Ом}$, чтобы обеспечить снижение уровня геоиндуцированных токов на 55 – 70 % соответственно.

На резисторе R и нейтрали СТ при однофазном КЗ появляется напряжение $U_N = RI_{\text{КЗ}}^{(1)}$, значение которого максимально в случае КЗ непосредственно на выводе обмотки ВН защищаемого силового трансформатора:

$$U_N \approx \frac{\sqrt{3}U_{\text{ВН}}R}{x_{\text{T}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{КЗ}}^{(1)}$ — ток однофазного КЗ; $U_{\text{ВН}}$ — номинальное напряжение обмотки ВН силового трансформатора; x_{T} — индуктивная составляющая сопротивления КЗ силового трансформатора.

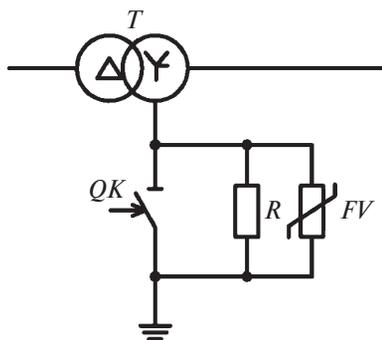


Рис. 2

У существующих СТ напряжением 110 кВ и выше имеется, как правило, изоляция нейтрали 35 кВ. Поэтому и допустимое напряжение нейтрали $U_{N_{\text{доп}}}$ должно составлять 35 кВ. Таким образом, сопротивление заземляющего резистора R ограничено сверху допустимым значением напряжения нейтрали:

$$R \leq \frac{U_{N_{\text{доп}}}}{\sqrt{3}U_{\text{ВН}}} x_{\text{T}}. \quad (4)$$

Анализ формул (2) и (4) позволяет заключить, что резистивное заземление нейтрали может быть достаточно эффективным только при сравнительно “коротких” воздушных линиях электропередачи, когда $r_{\text{ВЛ}} < (r_{\text{ВН1}} + r_{\text{ВН2}})$. В случае протяженной воздушной линии, когда в контуре протекания геоиндуцированного тока доминирующим станет активное сопротивление фазных проводов $r_{\text{ВЛ}}$, резистивное заземление нейтрали с учетом ограничения (4) не обеспечит заметного снижения геоиндуцированного тока и, следовательно, не исключит возможности насыщения магнитной системы СТ в период геомагнитной бури.

Избежать ограничения (4) при защите от воздействия ГИТ силовых трансформаторов, подключенных к протяженной воздушной линии, позволяет усложненная схема резистивного заземления нейтрали с защитными цепями, показанная на рис. 2 [10]. При отсутствии геомагнитных бурь (более 98 % рабочего времени) силовой трансформатор T работает с глухозаземленной нейтралью через короткозамыкатель QK . В период геомагнитных бурь (до 2 % рабочего времени) для ограничения геоиндуцированного тока создается режим резистивного заземления нейтрали путем отключения QK .

Для нормального функционирования резистивного заземления защитный уровень U_3 нелинейного ограничителя FV должен превышать значение падения напряжения на за-

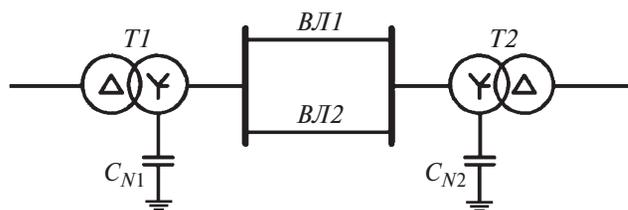


Рис. 3

земляющем резисторе R от протекания токов нулевой последовательности:

$$U_3 > \frac{U_0}{\sqrt{1+(x_{\text{T}(0)}/R)^2}}, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение нулевой последовательности, обусловленное несимметрией междуфазных напряжений; $x_{\text{T}(0)}$ — сопротивление нулевой последовательности силового трансформатора T .

Обычно $R < x_{\text{T}(0)}$, если сопротивление заземляющего резистора выбирается по критерию (2). Поэтому в зависимости от конкретного значения отношения $x_{\text{T}(0)}/R$ защитный уровень нелинейного ограничителя FV может быть существенно меньше возможного значения напряжения нулевой последовательности.

При возникновении несимметричного КЗ (однофазного или двухфазного) напряжение нейтрали силового трансформатора T ограничивается на безопасном уровне нелинейным ограничителем FV , пропускная способность которого должна соответствовать значению тока КЗ. В противном случае необходимо включать короткозамыкатель QK , лишая силовой трансформатор T защиты от воздействия ГИТ.

В [10] приведен пример резистивного заземления нейтрали силового автотрансформатора номинальной мощностью 500 МВ·А с номинальным напряжением 500/230 кВ. Показано, что резистор $R = 20$ Ом (2 МВт) и нелинейный ограничитель FV с уровнем ограничения 7,5 кВ обеспечивают уменьшение ГИТ с максимально возможного значения 200 А до предположительно безопасного уровня 40 А, т. е. в 5 раз.

Емкостное заземление нейтралей СТ (рис. 3) может служить более эффективным средством защиты от воздействия геоиндуцированных токов, поскольку конденсаторные батареи (КБ) C_{N1} , C_{N2} в нейтралях силовых трансформаторов $T1$, $T2$ полностью блокируют протекание геоиндуцированных токов по обмоткам ВН и исключают возможность насыщения магнитной системы.

Режим нейтралей силовых трансформаторов $T1$, $T2$ при емкостном заземлении определяется в нормальных условиях функционирования системы электроснабжения степенью несимметрии междуфазных напряжений, которая согласно ГОСТ Р 51317.4.30–2008 [11] характеризуется коэффициентами несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, %, соответственно:

$$K_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100; \quad (6)$$

$$K_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100, \quad (7)$$

где U_2 и U_1 — напряжения обратной и прямой последовательностей основной частоты.

Согласно ГОСТ Р 54149–2010 [12] нормально допустимые значения коэффициентов несимметрии составляют 2 %, а предельно допустимые значения — 4 %. Напряжение нулевой последовательности U_0 (в сетях 220, 330 и 500 кВ может достигать 8,2, 13,2 и 20 кВ соответственно) будет определять напряжения на нейтралах силовых трансформаторов $T1$, $T2$ относительно “земли” и соответственно напряжения U_{N1} , U_{N2} на КБ C_{N1} , C_{N2} . При этом напряжение обратной последовательности не оказывает влияния на режим нейтралей силовых трансформаторов $T1$, $T2$. Емкостное заземление этих трансформаторов можно считать эффективным в условиях несимметрии фазных напряжений линии, если $k_{N1} = (U_{N1}/U_0) \leq 0,1$ и $k_{N2} = (U_{N2}/U_0) \leq 0,1$. Указанные соотношения выполняются при $x_{N1} \leq 0,033x_{T1(0)}$ и $x_{N2} \leq 0,033(x_{T2(0)} + x_{ВЛ(0)})$, где $x_{T1(0)}$, $x_{T2(0)}$, $x_{ВЛ(0)}$ — сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов $T1$, $T2$ и воздушной линии соответственно.

При емкостном заземлении нейтралей СТ не должно также возникать условий, когда ток однофазного КЗ $I_K^{(1)}$ превышает ток трехфазного КЗ $I_K^{(3)}$. В противном случае необходимо проверять коммутационную способность выключателей по току $I_K^{(1)}$, поскольку условия их работы существенно утяжеляются, так как однофазные КЗ возникают гораздо чаще (в 40 раз и более), чем трехфазные. Поэтому для проверки эффективности емкостного заземления нейтралей следует рассмотреть наиболее тяжелый случай однофазного КЗ на выводе обмотки ВН СТ, например $T1$, в предположении, что обмотка низкого напряжения питается от шин бесконечной мощности.

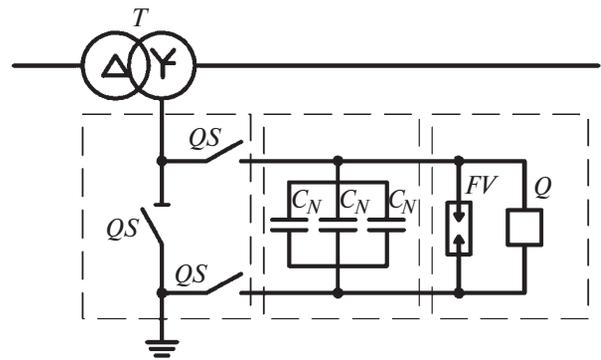


Рис. 4

Количественные оценки показывают, что емкостное сопротивление нейтрали $x_N^* = 1/(\omega C_N)$ не должно превышать значения $x_N^* = (x_N/x_{T(0)}) \leq 0,613$. Например, для трансформатора ТДЦ-250000/220 ($x_T = 25,7$ Ом) при $x_N^* = 0,3$ емкость C_N , напряжение U_N и мощность Q_N должны составлять в именованных единицах: $C_N = 400$ мкФ; $U_N = 57$ кВ; $Q_N \approx 410$ Мвар, а при $x_N^* = 0,1$ — соответственно: $C_N = 1240$ мкФ; $U_N = 14,3$ кВ; $Q_N = 78,5$ Мвар. Как видно, даже при $x_N^* = 0,3$ мощность КБ должна примерно в 1,64 раза превышать номинальную мощность защищаемого СТ, что совершенно неприемлемо. Если $x_N^* = 0,1$, то мощность КБ составит приблизительно 32 % номинальной мощности СТ, а при $x_N^* = 0,025$ она снизится примерно до 15,7 Мвар (6,3 % номинальной мощности СТ). Для дальнейшего уменьшения мощности КБ необходимо использовать систему емкостного заземления нейтралей силового трансформатора T , приведенную на рис. 4 [10, 13].

Коммутационный модуль, образованный разъединителями QS , обеспечивает глухозаземленный режим нейтралей во время нормальной эксплуатации и переход в режим емкостного заземления на периоды прогнозируемой геомагнитной активности. Шунтирующий модуль содержит разрядник FV (в качестве которого могут использоваться искровой промежуток, вентильный разрядник или нелинейный ограничитель перенапряжения) и выключатель Q (обычно вакуумный). Последний шунтирует разрядник FV с конденсаторной батареей C_N и обеспечивает глухое заземление нейтралей при возникновении во время геомагнитной бури несимметричного КЗ. Мощность батареи C_N определяется значением токов нулевой последовательности основной частоты и высших гармоник. Поэтому она непосредственно зависит от степени

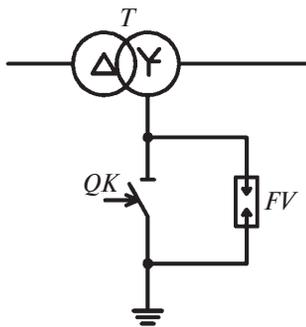


Рис. 5

несимметрии и несинусоидальности напряжения, т.е. определяется качеством электроэнергии в том узле энергосистемы, к которому подключен защищаемый СТ. При этом напряжение на C_N от токов нулевой последовательности с учетом постоянной составляющей в период геомагнитных бурь не должно достигать уровня срабатывания разрядника FV , выбираемого обычно в диапазоне 14 ÷ 20 кВ. Этого достаточно для защиты СТ от воздействия ГИТ и изоляции нейтрали от возможных перенапряжений при несимметричных замыканиях на землю в период геомагнитных бурь.

Следует рассмотреть один из вариантов реализации быстродействующего шунтирования КБ C_N с помощью вакуумного разрядника 4275 Bi-tron, обладающего высокими коммутационными способностями (30 кВ, 75 кА) и быстродействием (время включения — менее 1 мкс) [10]. Таких параметров достаточно для защиты конденсаторной батареи от токов несимметричных КЗ на землю и изоляции нейтрали СТ от кратковременных перенапряжений. Однако вакуумный разрядник 4275 Bi-tron предназначен для работы в импульсном режиме и характеризуется ограниченным электрическим зарядом. Поэтому по истечении одного-двух полупериодов основной частоты он должен шунтироваться контактами выключателя Q . Следует также отметить необходимость ограничения разрядного тока при шунтировании КБ вакуумным разрядником, чтобы не допустить повреждения конденсаторов или срабатывания встроенных предохранителей (на рис. 4 не показаны).

Рассмотренные системы емкостного заземления нейтрали имеют общий недостаток, заключающийся в том, что при любом способе шунтирования КБ во время аварийного режима не блокирует протекание геоиндуцированных токов. В результате ГИТ может складываться с аperiodической составляющей тока несимметричного КЗ, ускоряя насыщение магнитной системы СТ. Еще один суще-

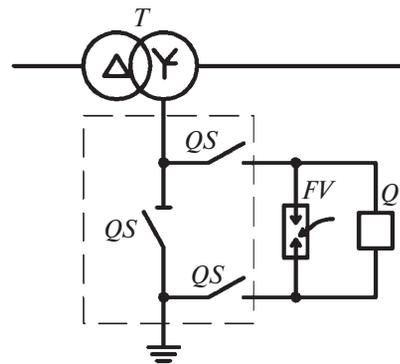


Рис. 6

ственный недостаток емкостного заземления нейтрали связан с возможностью возникновения резонансных явлений, особенно в электрических сетях сложной конфигурации. Поэтому целесообразность его применения в условиях конкретной электрической сети требует проведения дополнительного исследования с целью определения необходимых параметров КБ (напряжения, мощности) и оценки возможных негативных побочных явлений.

Активное заземление нейтрали. Наиболее простой его вариант — через искровой промежутки — показан на рис. 5 [13]. При отсутствии геомагнитных бурь короткозамыкатель QK обеспечивает глухозаземленный режим работы силового трансформатора T . На период прогнозируемой геомагнитной активности QK выключается и создает режим изолированной нейтрали, препятствующий протеканию геоиндуцированного тока. Для этого напряжение пробоя искрового промежутка FV должно превышать напряжение нулевой последовательности. При несимметричном КЗ нейтраль СТ заземляется через искровой промежуток FV . Недостатками рассмотренного варианта заземления нейтрали являются нестабильность разрядного напряжения и недостаточная пропускная способность искрового промежутка.

Более совершенный вариант активного заземления нейтрали может быть реализован на базе вакуумного разрядника 4275 Bi-tron и вакуумного выключателя с механическими контактами (см. рис. 6) [10]. Разъединители QS обеспечивают режим глухозаземленной нейтрали в нормальных условиях эксплуатации, а в периоды геомагнитной активности — режим изолированной нейтрали для блокирования геоиндуцированного тока. Вакуумный разрядник FV и вакуумный выключатель Q обеспечивают “быстрое” заземление нейтрали (за время менее 1 мкс) и протекание тока несимметричного КЗ, происходящего в период геомагнитных бурь. По окончании

аварийного режима вакуумный выключатель Q отключается, и СТ с изолированной нейтралью может продолжать работать до окончания геомагнитных бурь.

Следует отметить возможность использования для активного заземления нейтрали отечественных вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции серии РВУ, способных коммутировать напряжение до 100 кВ и токи до 200 кА за время менее 1 мкс.

Активное заземление нейтрали — перспективный способ защиты СТ, поскольку, как и емкостное заземление, обеспечивает полное блокирование ГИТ на весь период геомагнитных бурь, но без риска возникновения резонансных и феррорезонансных явлений, способных нарушить нормальный режим работы электрической сети. Однако для реализации активного заземления требуется большое количество различных коммутационных аппаратов: разъединителей, вакуумного разрядника и вакуумного выключателя, причем два последних используются в течение очень короткого интервала, не превышающего 2 % рабочего времени.

В этой связи следует обратить внимание на силовые полупроводниковые приборы, в частности силовые тиристоры, которые выпускаются в настоящее время с номинальным напряжением до 10 кВ и номинальным током до 10 кА. Таких их параметров вполне достаточно для практической реализации активного заземления, причем использовать тиристоры можно в течение всего рабочего времени.

Выводы

1. Резистивное заземление нейтрали позволяет ограничить геоиндуцированный ток, но не обеспечивает полной защиты СТ при геомагнитных бурях. Однако оно дает дополнительный положительный эффект ограничения токов однофазных КЗ.

2. Емкостное заземление нейтрали способно исключить возможность протекания геоиндуцированного тока в обмотках высокого напряжения при мощности КБ не более 10 % номинальной мощности защищаемого СТ. Для этого емкостное сопротивление КБ необходимо выбирать с учетом сопротивления нулевой последовательности защищаемого трансформатора. В сложных системах электроснабжения при значительной несимметрии и несинусоидальности фазных напряжений целесообразность применения емкостного заземления нейтрали требует дополнительной

проверки для оценки возможных негативных побочных явлений, в частности — резонансных.

3. Активное заземление нейтрали обеспечивает полное блокирование геоиндуцированных токов в заземленных обмотках защищаемого СТ без риска возникновения резонансных явлений, но требует для практической реализации разнообразного и дорогостоящего коммутационного оборудования, степень использования которого крайне низкая (менее 2 %).

Список литературы

1. **Kappenman J.** A Perfect Storm of Planetary Proportions. — IEEE Spectrum, 2012, vol. 49, Issue 2.
2. **Girgis R.** Effects of GIC on power transformers and power systems. — Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), IEEE PES, 2012.
3. **Walling R. A., Kahn A. N.** Characteristics of transformer exciting — current during geomagnetic disturbances. — IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, vol. 6, Issue 4.
4. **Prediction of extreme geomagnetically induced currents in the UK high-voltage network / C. D. Beggan, D. Beamish, A. Richards and other.** — Space Weather, 2013, vol. 11.
5. **Document C-15.** Procedures for Solar Magnetic Disturbances Which Affect Electric Power Systems, 2007 (www.npcc.org/Standards/Procedures/c-15.pdf).
6. **Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template.** Transmission Operator (www.nerc.com/docs/pc/gmdtf/Template_TOP.pdf).
7. **Мозгалева К. В., Неклепаев Б. Н., Шунтов А. В.** Об эффективности заземления нейтралей автотрансформаторов через реактор или резистор. — Электричество, 2004, № 1.
8. **Industry design — GIC reduction in power grids.** — Electric Power Grid Vulnerability to Geomagnetic Storm, 2009 (www.midwestreliability.org/00_events/2009_CIP_Workshop/10_Kappenman_MRO_Dec1_2009.pdf).
9. **Prijola R.** Effect of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems. — Earth Planet Space, 60, 2008.
10. **SolidGround** automatically blocks DC currents from flowing in the neutral of large power transformers ([www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/cf29ce6d9f4dd0cc12579f100529ca2/\\$file/SolidGround_2GNM110098_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/cf29ce6d9f4dd0cc12579f100529ca2/$file/SolidGround_2GNM110098_2.pdf)).
11. **ГОСТ Р 51317.4.30–2008.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
12. **ГОСТ Р 54149–2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
13. **Гершенгорн А. И.** Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем. — Электрические станции, 1993, № 6.