



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ эффективности емкостного заземления для защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения от воздействия геоиндуцированных токов

Вахнина В. В., канд. техн. наук, Кувшинов А. А., доктор техн. наук,
Рыбалко Т. А., инж.

Тольяттинский государственный университет

Разработана методика расчета геоиндуцированных токов в нейтралях и заземленных обмотках силовых трансформаторов сложной системы электроснабжения с автотрансформаторными связями, учитывающая географическое положение трансформаторных подстанций. Исследовано влияние емкостного заземления на распределение геоиндуцированных токов между отдельными силовыми трансформаторами системы электроснабжения. Показано, что емкостное заземление нейтрали отдельного трансформатора системы электроснабжения существенно усиливает отрицательное воздействие геоиндуцированных токов на остальные трансформаторы с глухозаземленными нейтральями.

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

При геомагнитных бурях (ГМБ) в воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) систем электроснабжения (СЭС) 110 кВ и выше с глухозаземленными нейтральями силовых трансформаторов (если при этом точек заземления не менее двух) протекают геоиндуцированные токи (ГИТ) до нескольких десятков и даже сотен ампер (в фазе), которые влияют на работу этих силовых трансформаторов (СТ) [1]. Поэтому для обеспечения безаварийного их функционирования требуется защита от воздействия ГИТ [2].

Одним из существующих способов защиты трансформатора от воздействия ГИТ является установка конденсаторной батареи (КБ) в заземленную нейтраль [2, 3], которая полностью блокирует протекание ГИТ по заземленным обмоткам и исключает возможность насыщения магнитной системы. Однако к такой системе заземления нейтрали силового трансформатора предъявляются довольно жесткие требования:

обеспечение малого сопротивления для тока промышленной частоты при несимметрии напряжения и замыкании на землю;

возможность быстрого шунтирования конденсаторной батареи во время переходных и аварийных процессов для защиты силового трансформатора и правильного функционирования релейной защиты;

автоматическое срабатывание шунтирующего устройства в течение нескольких микросекунд, возможность многократного пропускания тока несимметричного КЗ.

Таким требованиям удовлетворяет система емкостного заземления нейтрали силового трансформатора T (рис. 1) [3], в которую входят коммутационный модуль, КБ и шунтирующий модуль. Коммутационный модуль, включающий в себя разъединители QS , обеспечивает глухозаземленный режим нейтрали во время нормальной эксплуатации и переход в режим емкостного заземления на период ГМБ или периоды прогнозируемой геомагнитной активности. Шунтирующий модуль содержит разрядник FV (в качестве него могут использоваться искровой промежуток,

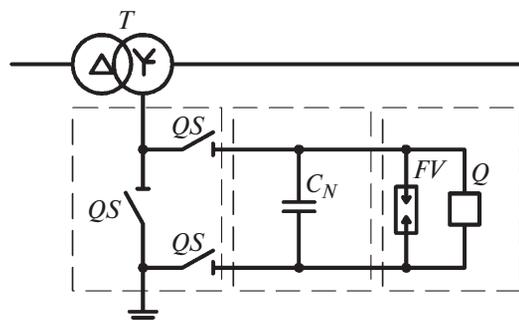


Рис. 1

вентильный разрядник или нелинейный ограничитель перенапряжения) и выключатель Q (обычно вакуумный), который шунтирует этот разрядник и конденсаторную батарею C_N и обеспечивает глухое заземление нейтрали при возникновении во время ГМБ несимметричного КЗ.

Мощность КБ определяется значениями токов нулевой последовательности основной частоты и высших гармоник, поэтому непосредственно зависит от степени несимметрии и несинусоидальности напряжения, т. е. определяется качеством электроэнергии в том узле электроэнергосистемы, к которому подключен защищаемый СТ [4]. При этом напряжение на C_N от токов нулевой последовательности с учетом постоянной составляющей в период ГМБ не должно достигать уровня срабатывания разрядника FV , выбираемого обычно в диапазоне 14 – 20 кВ. Этого достаточно для защиты силового трансформатора от воздействия ГИТ, а его нейтрали — от возможных перенапряжений при несимметричных замыканиях на землю в период ГМБ.

Однако при применении емкостного заземления для защиты силовых трансформаторов от ГИТ в системах электроснабжения следует учитывать, что его использование для каждого силового трансформатора экономически неоправданно, поскольку мощность КБ вполне соизмерима с номинальной мощностью защищаемого СТ. Правда, мощность КБ можно снизить путем введения дополнительного коммутационного оборудования, но при этом на время протекания аварийных процессов утрачиваются защитные функции, а емкостное заземление тем не менее остается дорогостоящим мероприятием.

Исходя из указанного, надо сделать вывод о необходимости с помощью одной конденсаторной батареи обеспечить защиту нескольких, а в идеале — всех силовых трансформаторов рассматриваемой СЭС. Для этого потребуется выбрать место включения КБ, а также оценить значение ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов до и после ее установки, так как включение КБ неизбежно вызовет перераспределение ГИТ, в результате которого может увеличиться воздействие ГИТ на отдельные силовые трансформаторы СЭС.

Расчетная схема системы электроснабжения. Рассмотрим решение поставленной задачи на примере системы электроснабжения крупного промышленного района, расчетная

схема которой приведена на рис. 2. В состав СЭС входят гидроэлектростанция ГЭС, тепловая электростанция ТЭЦ, трансформаторные подстанции ТПП – ТПП10 с напряжениями 500/220/110, 220/110, 220/110/10, 110/6 кВ. На рисунке трансформаторные подстанции ТПП1 – ТПП9 условно представлены трансформаторами (автотрансформаторами) Т1 – Т9 соответственно, а трансформаторная подстанция ТПП10 — автотрансформаторами Т10 и Т11. На ТПП8 установлены однофазные силовые трансформаторы, на ТПП10 — группа однофазных силовых автотрансформаторов, все остальные силовые трансформаторы и автотрансформаторы — трехфазные.

В рассматриваемую СЭС входят протяженные воздушные ЛЭП 500, 220 и 110 кВ, между которыми осуществляется автотрансформаторная связь. Данная система характеризуется признаками магистральной и радиальной топологии [5, 6]. Магистральная часть образована воздушными линиями электропередачи ВЛ8 и ВЛ9 с номинальным напряжением 500 кВ, по которым осуществляется транзит электроэнергии от ГЭС в электроэнергосистему ЭЭС2. Промежуточный отбор мощности выполняется на трансформаторной подстанции ТПП10, содержащей автотрансформаторы Т10 и Т11 с номинальными напряжениями 500/200 кВ и 500/110 кВ соответственно. Радиальная часть электрической сети образована воздушными линиями ВЛ1 – ВЛ6 с номинальным напряжением 220 кВ и ВЛ7 с номинальным напряжением 110 кВ. По ВЛ1 осуществляется транзит электроэнергии от ТЭЦ, а по ВЛ4 — выход в электроэнергосистему ЭЭС1. Все силовые трансформаторы и автотрансформаторы Т1 – Т11 рассматриваемой СЭС имеют глухозаземленные нейтрали. Поэтому при интенсивной ГМБ возможно возникновение значительных геоиндуцированных токов в нейтралях и заземленных обмотках силовых трансформаторов и автотрансформаторов, фазных проводах воздушных ЛЭП, которые могут привести к нарушению электроснабжения потребителей [7].

Схема замещения системы электроснабжения для расчета ГИТ (рис. 3). Расчет ГИТ в СЭС выполняется с применением законов линейных электрических цепей постоянного тока [8] и моделей с дискретным заземлением [9], где источником ЭДС является рассчитанное геоэлектрическое поле [10]. В схеме замещения учтены активные сопротивления фазных проводов воздушных линий ВЛ1 – ВЛ9,

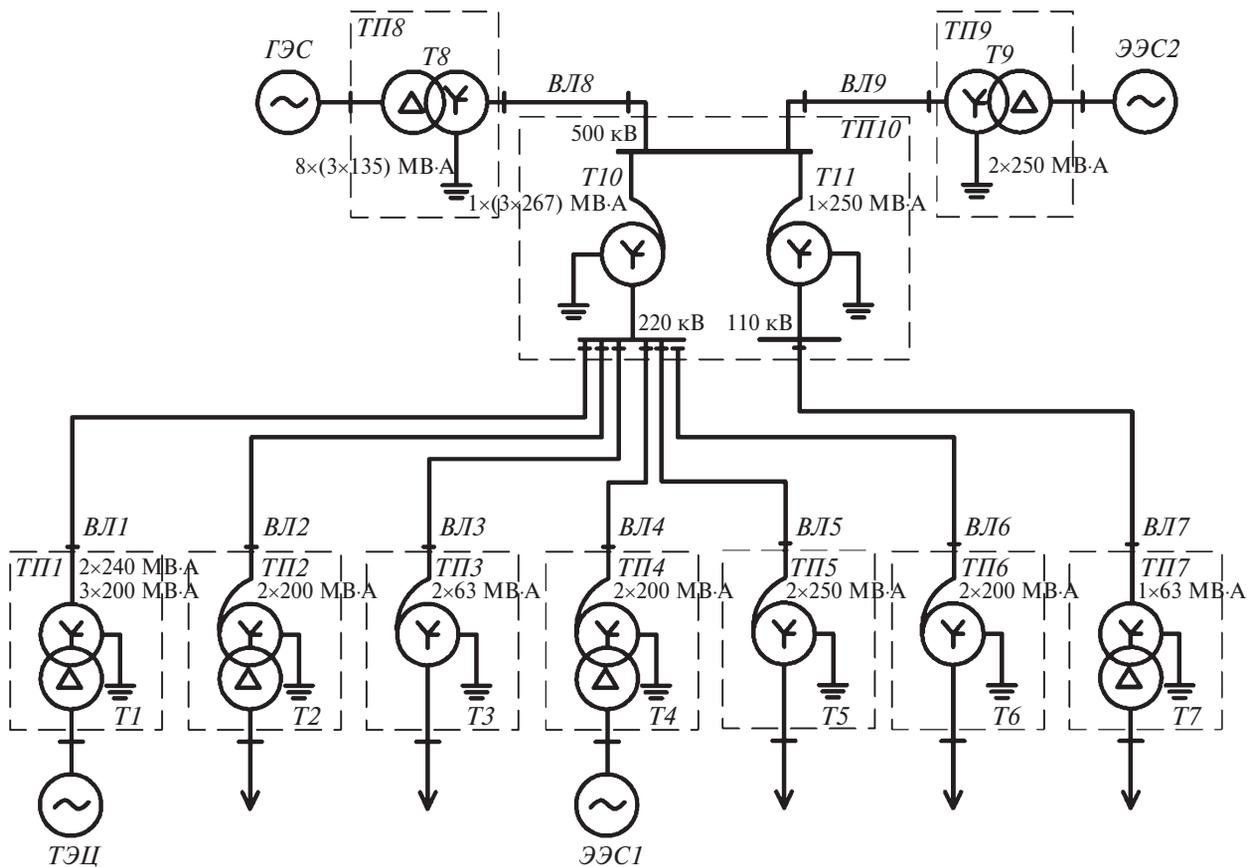


Рис. 2

обмоток ВН силовых трансформаторов $T1$, $T2$, $T4$, $T7$ и обмоток ВН, СН силовых автотрансформаторов $T3$, $T5$, $T6$, $T10$, $T11$, а также заземляющих устройств трансформаторных подстанций $ТП1 - ТП10$.

На схеме приняты следующие обозначения:

$r_{ли}$ — активные сопротивления фазных проводов воздушных линий $ВЛ_i$;

r_{Ti} — активные сопротивления обмоток ВН силовых трансформаторов (автотрансформаторов) T_i ;

r_{B10} , r_{B11} и r_{C10} , r_{C11} — активные сопротивления обмоток ВН и СН силовых автотрансформаторов $T10$ и $T11$;

$r_{3,y(i)}$ — сопротивления растекания заземляющих устройств трансформаторных подстанций $ТП(i)$. В расчетах принято $r_{3,y(i)} = 0,5 \text{ Ом}$ [11].

Значения активных сопротивлений, Ом, воздушных линий электропередачи и силовых трансформаторов и автотрансформаторов схемы замещения СЭС представлены в табл. 1. ЭДС $E_1 - E_9$ учитывают разности потенциалов заземляющих устройств силовых трансформаторов и автотрансформаторов $T1 - T11$, возникающих в период ГМБ под воздействием геоэлектрического поля.

Для оценки значения ЭДС E_i необходимо учитывать:

взаимное пространственное расположение трансформаторных подстанций $ТП1 - ТП10$ и соответственно заземляющих устройств на географической карте местности;

ограниченную протяженность линий $ВЛ1 - ВЛ9$ (не более 230 км), позволяющую считать напряженность геоэлектрического поля неизменной в пределах пространственной области, занимаемой рассматриваемой электрической сетью.

Взаимное пространственное расположение на географической карте местности трансформаторных подстанций $ТП1 - ТП10$, размеры которых во много раз меньше протяженности ЛЭП, наиболее просто учитывается в полярной системе координат, задаваемой:

полюсом 0, который совмещается с одним из заземляющих устройств рассматриваемой СЭС. В качестве полюса целесообразно принять заземляющее устройство подстанции с наибольшим количеством отходящих линий. В данном случае — это $ТП10$ с силовыми автотрансформаторами $T10$ и $T11$, потенциал заземляющего устройства которой принимается равным нулю;

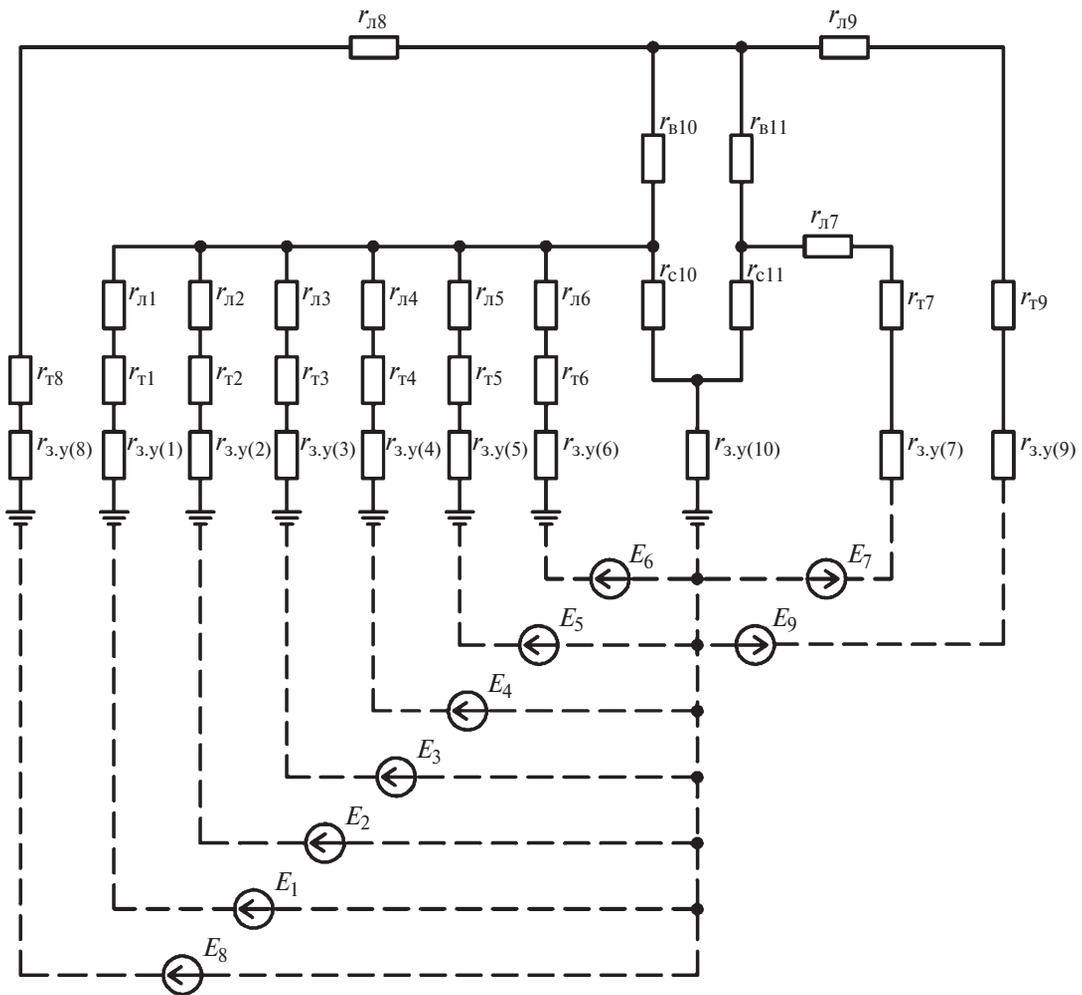


Рис. 3

полярной осью, которая совмещается с направлением вектора напряженности геоэлектрического поля либо с одним из географических направлений, либо с трассой наиболее протяженной воздушной ЛЭП.

Если полярную ось совместить с направлением горизонтальной составляющей вектора \vec{E}_0 напряженности геоэлектрического поля, то взаимное расположение трансформаторных подстанций $ТП1 - ТП10$ и соответствующих

заземляющих устройств рассматриваемой СЭС можно представить в виде диаграммы на рис. 4. Потенциал заземляющего устройства силовых трансформаторов и автотрансформаторов $ТП_i$ будет определяться значением 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

Таблица 1

Воздушные линии электропередачи												
$r_{Л1}$	$r_{Л2}$	$r_{Л3}$	$r_{Л4}$	$r_{Л5}$	$r_{Л6}$	$r_{Л7}$	$r_{Л8}$	$r_{Л9}$				
0,92	0,33	0,26	2,26	1,87	3,58	1,76	0,07	0,5				
Силовые трансформаторы и автотрансформаторы												
$r_{Т1}$	$r_{Т2}$	$r_{Т3}$	$r_{Т4}$	$r_{Т5}$	$r_{Т6}$	$r_{Т7}$	$r_{Т8}$	$r_{Т9}$	$r_{В10}$	$r_{В11}$	$r_{с10}$	$r_{с11}$
0,151	0,058	0,269	0,151	0,043	0,058	0,1245	0,209	0,209	0,183	0,307	0,183	0,307

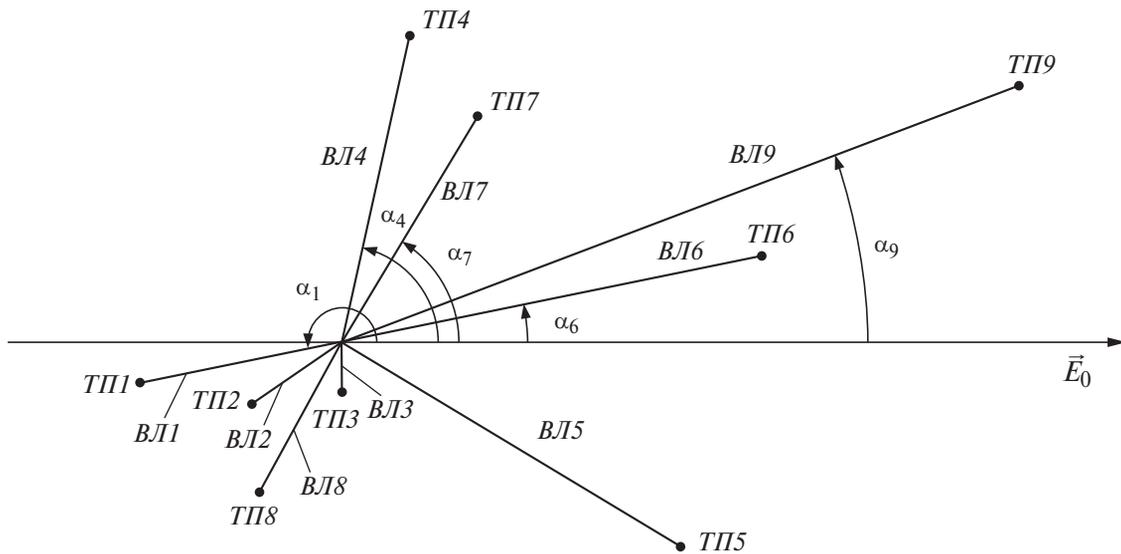


Рис. 4

ЭДС E_i в схеме замещения (см. рис. 3) будет определяться из выражения

$$E_i = \varphi_i - \varphi_0 = E_0 l_i \cos \alpha_i, \quad (1)$$

где φ_i — потенциал заземляющего устройства трансформаторной подстанции $TП_i$; $\varphi_0 = 0$ — потенциал заземляющего устройства трансформаторной подстанции, совмещенной с полярным полюсом 0; α_i — угол ориентации i -й воздушной ЛЭП относительно горизонтальной составляющей вектора \vec{E}_0 напряженности геоэлектрического поля.

Расчет геоиндуцированных токов в СЭС. Значение ГИТ в нейтрали силового трансформатора T_i с учетом выражения (1) можно определить по формуле

$$I_{\text{ГИТ}i} = E_i / R_{\Sigma i}, \quad (2)$$

где $R_{\Sigma i}$ — суммарное сопротивление i -го контура протекания ГИТ.

Для расчета ГИТ в исходной схеме замещения СЭС параллельные ветви заменены эквивалентными источниками ЭДС.

Упрощенная схема замещения позволяет составить систему уравнений для контурных токов. Значения ГИТ I_{N_i} , протекающих в заземляющих устройствах трансформаторных подстанций $TП1 - TП10$, а также в фазных обмотках ВН ($I_{\text{ВН}}$) и СН ($I_{\text{СН}}$) всех силовых трансформаторов и автотрансформаторов рассматриваемой СЭС при отсутствии емкостного заземления, приведены в табл. 2. Как видно, наибольший ГИТ протекает в магистральной наиболее протяженной части СЭС. Однако степень его воздействия на силовые трансформаторы $T8$, $T9$ необходимо определять с учетом конкретного состава трансформаторного оборудования. Например, расчетный трансформатор $T8$ представляет собой восемь параллельно работающих групп однофазных трансформаторов (главные трансформаторы ГЭС — рис. 2). Поэтому ГИТ, протекающий по обмотке ВН одного трансформатора, составит приблизительно только 50,36 А. По сравнению с ним ГИТ, протекающий по обмотке ВН силового трансформатора $TП7$, существенно больше ($\approx 131,5$ А). Причем в значительной степени это опреде-

Таблица 2

ГИТ, А	$TП1$	$TП2$	$TП3$	$TП4$	$TП5$	$TП6$	$TП7$	$TП8$	$TП9$	$TП10$	
										$T10$	$T11$
$I_{\text{СН}}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 80,74	134,73
$I_{\text{ВН}}$	3,54	— 29,34	— 43,89	54,7	28,71	— 2,13	— 131,5	50,36	— 179,43	— 47,3	3,27
I_N	53,13	— 176,04	— 263,35	327,97	172,23	— 12,77	— 394,37	1208,6	— 1076,59	161,98	

ляется как протяженностью *ВЛ7* и расположением подстанции *ТП7*, так и сильной связанностью рассматриваемой СЭС.

Следует обратить внимание также и на значительный ГИТ, протекающий по обмоткам автотрансформаторов *T10*, *T11*. Наиболее нагруженными из них являются обмотки СН, к которым подключена радиальная часть электрической сети. В них ГИТ существенно превышают суммарный ток нейтралей силовых автотрансформаторов *T10*, *T11*. В частности, ГИТ в обмотке СН *T11* составляет ≈ 135 А, т.е. практически равен значению ГИТ в обмотке ВН силового трансформатора *T7*.

Расчет геоиндуцированных токов в СЭС при емкостном заземлении нейтрали. Выполненный расчет ГИТ позволяет выявить силовой трансформатор, который в период ГМБ подвергается наиболее сильному воздействию и поэтому нуждается в защите в первую очередь. Один из наиболее предпочтительных ее вариантов — включение конденсаторной батареи в нейтраль автотрансформаторов *T10* и *T11* трансформаторной подстанции *ТП10*. Как показывают расчеты, это вызывает кардинальное изменение значения ГИТ не только в нейтралях силовых трансформаторов и автотрансформаторов *T1–T9*, но и в обмотках ВН и СН автотрансформаторов *T10*, *T11*.

Сравнивая значения ГИТ до и после включения конденсаторной батареи, можно отметить как позитивные, так и негативные последствия. К позитивным следует отнести существенное снижение ГИТ в нейтрали трансформатора *T7* (в 8 раз), а также в обмотках СН автотрансформаторов *T10* (в 1,58 раза) и *T11* (в 2,64 раза), а к негативным — значительное увеличение ГИТ в нейтралях трансформаторов *T1–T6* (более чем в 7 раз), *T8*, *T9* (более чем в 5 раз) и в обмотках ВН автотрансформаторов *T10* (в 4,13 раза) и *T11* (в 10,65 раза). Как видно, негативные последствия гораздо существеннее.

Выводы

1. Значение ГИТ в нейтралях и заземленных обмотках силовых трансформаторов и автотрансформаторов разветвленной СЭС в периоды ГМБ определяется географическим расположением трансформаторных подстанций и ориентацией вектора напряженности геоэлектрического поля у поверхности земли относительно трассы наиболее протяженных воздушных ЛЭП.

2. Оценку эффективности емкостного заземления в разветвленных СЭС необходимо проводить на основе сравнения значений ГИТ в нейтралях и заземленных обмотках силовых трансформаторов и автотрансформаторов до и после установки одной или нескольких конденсаторных батарей.

3. Локальное использование конденсаторной батареи может обусловить такое перераспределение ГИТ, при котором усиливается отрицательное воздействие на большинство силовых трансформаторов.

4. Для полной защиты от воздействия ГИТ необходимо включать конденсаторные батареи в нейтраль всех силовых трансформаторов и автотрансформаторов СЭС. В этом случае их протекание полностью исключается. Однако такое “массовое” использование емкостного заземления — крайне дорогостоящее, поскольку мощности конденсаторной батареи и защищаемого силового трансформатора вполне соизмеримы.

Список литературы

1. **Albertson V. D.** Geomagnetic disturbance cause and power systems effects. — IEEE PES Meeting, Long Beach, CA, 1989, № 7.
2. **Гершенгорн А. И.** Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем. — Электрические станции, 1993, № 6.
3. **GIC mitigation: A neutral blocking / bypass device to prevent the flow of GIC in power systems / J. G. Kappenman, S. R. Norr, G. A. Sweezy and other.** — IEEE Trans. Power Deliv., 1991, vol. 6, № 3.
4. **Цырук С. А., Янченко С. А., Рыжкова Е. Н.** Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях. — Вестник МЭИ, 2013, № 3.
5. **Кудрин Б. И.** Электроснабжение промышленных предприятий. — М.: Интермет Инжиниринг, 2005.
6. **Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича.** — М.: ЭНАС, 2007.
7. **Kappenman J. G.** Geomagnetic storms and Their Impact on Power Systems: Lessons Learned from Solar Cycle 22 and the Outlook for Solar Cycle 23. — IEEE Power Engineering Review, 1996, № 5.
8. **Boteler D. H.** Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada. — Natural Hazards 23, 2001.
9. **Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / Под ред. А. Ф. Дьякова.** — М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
10. **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.
11. **Карякин Р. Н.** Заземляющие устройства электроустановок: Справочник. — М.: Энергосервис, 2006.