



РЕДАКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА

РФ, 115280, Москва, 3-й Автозаводский пр-д, 4, корп. 1
Тел/факс (495) 234-74-17, тел. (495) 234-74-19
E-mail: el-stantsii@rambler.ru
www.elst.energy-journals.ru

Electricieskie Stantsii

3 Avtozavodskii Proezd, 4, korp. 1, Moscow, 115280, Russia
tel/fax (7-495) 234-74-17, tel. (7-495) 234-74-19

№ 288 от 3.12.2019 г.

Справка

Статья *Ю.П.Гусева, А.Лхамдондог, Ю.В.Монакова, Н.В.Яговой, В.А. Пилипенко* "**Оценка воздействия геоиндуцированных токов на пусковые режимы силовых трансформаторов**" получила положительный отзыв рецензента и после утверждения редакционной коллегией журнала будет опубликована в первом квартале 2020 г. (в февральском или мартовском номере).

Зам. главного редактора

Т.И. Соловьёва

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ПУСКОВЫЕ РЕЖИМЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Ю.П.Гусев¹, А.Лхамдондог¹, Ю.В.Монаков¹, Н.В.Ягова², В.А. Пилипенко²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук
г. Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования влияния на пусковые режимы трансформаторов знакопостоянных токов в обмотках силовых трансформаторов, происхождение которых может быть связано с геомагнитными возмущениями в магнитосфере и ионосфере Земли и с электромагнитными процессами в электроэнергетических системах. Проанализированы процессы намагничивания силовых трансформаторов, вызываемые геоиндуцированными токами (ГИТ), с учетом явления гистерезиса. Расчетное исследование проведено на модели участка сети 500 кВ с помощью программного обеспечения ЕМТР-RV (PowerSys, Франция), позволяющего проводить расчеты переходных процессов в нелинейных электрических цепях с учетом явления гистерезиса. Обоснована необходимость учета ГИТ при расчетах термической и электродинамической стойкости трансформаторов, при выборе уставок релейных защит.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, знакопостоянный ток, геоиндуцированный ток, насыщение магнитопровода, гистерезис

Abstract

This paper describes the researching results of sign-constant currents impact appears in power transformer windings on inrush modes, the origin of which can be associated with geomagnetic disturbances in the Earth's magnetosphere and ionosphere and with electromagnetic processes in electric power system. The magnetization processes of power transformers caused by

geomagnetically induced currents (GIC) are analyzed, with taking into account the hysteresis phenomenon. The calculation study was carried out on a 500 kV network section model using the EMTP-RV software (PowerSys, France), which allows performing calculations of transient processes in non-linear electrical circuits with taking into account hysteresis phenomenon. The need of taking GIC into account in the calculations of transformers thermal and electrodynamic withstand during setting of protective relays is substantiated.

Keywords: power transformer, sign-constant current, geomagnetically induced current, magnetic core saturation, hysteresis

В северных широтах России, при магнитных бурях, в проводах воздушных линий электропередачи, индуцируются низкочастотные ЭДС, вызывающие протекание по высоковольтным обмоткам трансформаторов продолжительных по времени знакопостоянных токов, называемых геоиндуцированными токами (ГИТ). Такие токи возникают при геомагнитных возмущениях [1]. При продолжительном протекании знакопостоянных токов в обмотках трансформаторов возникает риск перехода магнитопровода в состояние насыщения, что может привести к росту амплитуды тока, изменению гармонического состава токов обмоток. Данные процессы могут стать причиной ложных срабатываний релейной защиты и отключений силовых трансформаторов.

Влияние геомагнитных возмущений и связанных с ними ГИТ разной интенсивности на электроэнергетические системы, изучено недостаточно. В работе [2] исследуются воздействия ГИТ на трансформаторы в установившихся режимах, без рассмотрения влияния на переходные процессы [3]. В ранее выполненных работах влияние ГИТ на трансформаторы исследовалось без учета явления гистерезиса. Негативное влияние ГИТ на электроэнергетические системы было установлено по результатам анализа причин нескольких «блэкаутов», например, после крупной аварии в провинции Квебек (Канада), в Швеции и др. Типичные значения ГИТ, измеренные в заземленных нейтралях трансформаторов, соединенных линиями электропередач (ЛЭП), в Финляндии и Скандинавии при магнитных бурях составили от единиц до нескольких десятков ампер [4], рекордный ток, зарегистрированный во время магнитной бури 2000 года в Швеции, составил 300 А [5].

Последствия геомагнитных возмущений на электроэнергетические системы определяются следующими факторами: параметрами магнитного поля в магнитосфере и ионосфере Земли (амплитуда, частотный состав и др.); сопротивлением земли с учетом поверхностного эффекта в зависимости от спектрального состава ГИТ [6]; конфигурацией

и составом оборудования сети. Геомагнитные возмущения являются непериодическими, имеют пульсации со спектром частот от 1 до 10 мГц продолжительностью от единиц до десятков минут [7]. Совокупность геомагнитных возмущений различных типов может создать знакопостоянный ток продолжительностью сотни минут. ГИТ амплитудой в десятки и сотни ампер возникают при масштабных пространственных изменениях геомагнитного поля.

Проведенный авторами ранее статистический анализ пространственных возмущений [8] показал, что на геомагнитных широтах 60-64° (например, на линии Санкт-Петербург - Мурманск геомагнитная широта примерно на 4 градуса ниже географической, и указанный диапазон соответствует участку Беломорск-Мончегорск) средняя частота возникновения возмущений с масштабом в сотни километров и максимальным $|dB/dt| > 6 \text{ нТл/с}$ составляет несколько десятков дней, при этом значения $|dB/dt| > 2 \text{ нТл/с}$ уже могут приводить к аварийным ситуациям [9].

Наибольшие амплитуды ГИТ встречаются в северных широтах. С расширением электрических сетей и увеличением протяженности высоковольтных ЛЭП риск возникновения ГИТ на низких широтах возрастает. В РФ мало внимания уделяется исследованию влияния ГИТ на электрооборудование электрических сетей и отсутствуют соответствующие нормативные документы [10].

При исследовании воздействия знакопостоянных токов на силовые трансформаторы необходимо учитывать, что магнитопроводы трансформаторов изготавливаются из различных марок электротехнических анизотропных холоднокатаных сталей [11]. Стали подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые [12, 13], имеют сложную доменную структуру, их магнитные свойства зависят от размеров зерн кристаллов, направления воздействия магнитного поля, наличия деформаций и т.д. Механические деформации, которые могут возникать в магнитопроводе трансформатора в процессе его транспортировки и эксплуатации, также могут изменять магнитные характеристики стали магнитопровода трансформатора, в частности, могут увеличить его коэрцитивную силу, что изменяет форму и ширину динамических и частных петель гистерезиса.

Процессы намагничивания силовых трансформаторов оказывают значительное влияние на их пусковые режимы. Пусковой режим трансформатора является нормальным режимом, но переходные процессы, возникающие при включении трансформатора, приводят к появлению бросков намагничивающих токов (БНТ), многократно превышающих номинальные. Кратность БНТ определяется пиковыми значениями токов обмотки. БНТ возникают как при включении трансформаторов на холостой ход, так и при включении их под нагрузкой, а также при восстановлении напряжения после отключений

коротких замыканий. Амплитуда БНТ будет максимальной в той фазе трансформатора, напряжение которой в момент подключения к источнику переходит через нуль. В пусковых режимах амплитуда и постоянная времени затухания БНТ зависят от мощности трансформатора. Например, выход в установившийся режим при мощности трансформатора более 400 МВА может длиться десятки секунд, при этом кратность БНТ составит $3\div 4$ от номинального тока трансформатора [14]. БНТ при включении трансформатора может вызвать ложное срабатывание дифференциальных релейных защит (ДФЗ). Также при плановых и аварийных отключениях трансформатора в магнитопроводе появляется остаточная намагниченность, и при повторных включениях трансформатора без принятия мер по его размагничиванию, может дополнительно привести к росту амплитуды БНТ и изменению гармонического состава токов. Предотвращение ложного срабатывания ДФЗ в пусковых режимах обеспечивается торможением второй гармоникой тока, использованием быстронасыщающихся трансформаторов тока и другими способами. Обеспечение надежной работы релейных защит осложняется необходимостью различать БНТ и токи коротких замыканий [15].

Знакопостоянные ГИТ в обмотках силовых трансформаторов создают дополнительное подмагничивание либо размагничивание в зависимости от направления магнитных потоков ГИТ и сетевого источника. Наличие ГИТ в обмотках трансформатора может привести к насыщению отдельных стержней магнитопровода, и при включении трансформатора возрастут амплитуды БНТ, изменится и гармонический состав тока.

В ходе работы были сопоставлены БНТ в трансформаторе без ГИТ и с ГИТ, насыщающем стержень магнитопровода с обмоткой, подключаемой к источнику при прохождении напряжения через нуль. Исследование проводилось для моделей трансформатора, учитывающих процессы намагничивания как по основной кривой зависимости индукции от напряженности магнитного поля, так и с учетом динамических и частных петель гистерезиса. Сопоставлялись амплитуды БНТ, гармонические составы токов в обмотках, потокосцепления обмоток, остаточные намагниченности при отсутствии и наличии ГИТ.

Расчетная модель силового трансформатора разработана на основе теории Преайзаха [16]. Она учитывает процессы насыщения магнитопровода трансформатора и явление гистерезиса. Учет явления гистерезиса осуществлялся для нескольких значений коэрцитивной силы, отражающих наличие последствий деформации магнитопровода трансформатора в процессе его транспортировки или эксплуатации.

Расчетная схема исследуемого участка сети 500 кВ приведена на рис. 1. Схема содержит трехфазный источник G переменного неизменного напряжения, повышающий

трансформатор ($TP1$), одноцепную линию электропередач ($ЛЭП$) напряжением 500 кВ протяженностью 300 км, понижающий трансформатор ($TP2$), заземлители R_{3y} сопротивлением 0,5 Ом. В качестве источника ГИТ использовался источник ЭДС $E_{ГИТ}$ с сопротивлением земли R_3 [17], включенного между нейтралями трансформаторов. Структурная схема модели в виде скриншота программы *EMTP-RV* показана на рис. 2. В качестве объекта исследования был выбран силовой трансформатор типа ТЦ-630000/500 [18].

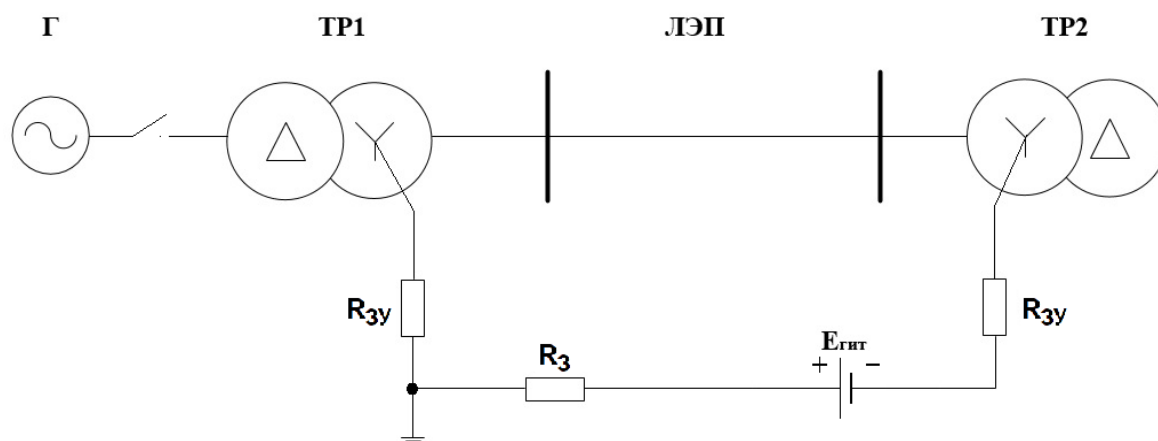


Рис. 1. Расчетная схема исследуемого участка сети 500 кВ

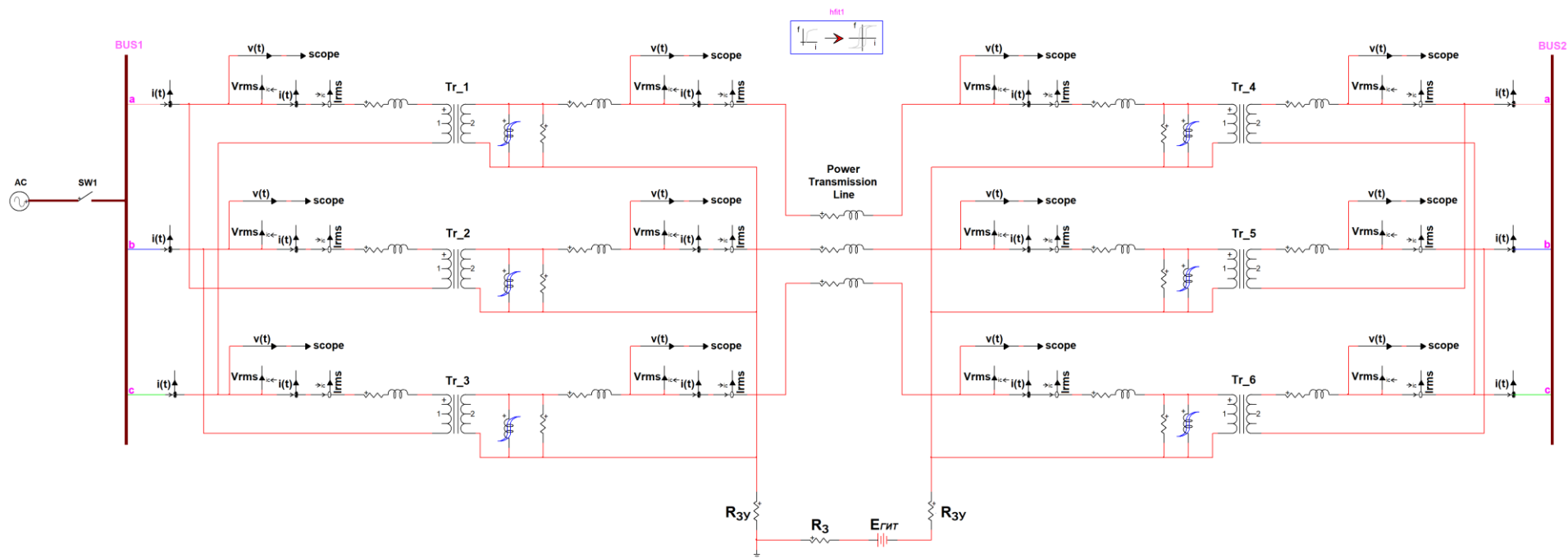


Рис. 2. Скриншот модели для исследования влияния ГИТ на БНТ трансформаторов

Верификация расчетной модели проведена путем сопоставления значений коэффициента трансформации, тока холостого хода, потерь холостого хода и короткого замыкания, полученных с помощью модели, с их паспортными значениями. Погрешность расчетов не превысила 10%.

При разработке модели была использована схема замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами [2]. В данном исследовании влияние грозозащитных тросов не учитывалось, т.к. они создают независимый от трансформаторов контур для ГИТ и их роль должна исследоваться дополнительно.

Исследования проводились с углами подключения напряжения источника к трансформатору $TP1$, соответствующими переходу напряжения фазы A через нуль.

Перед подключением трехфазного источника к трансформатору, при расчетах БНТ с ГИТ, выполнялся расчет переходного процесса, при котором нарастание тока в нейтралях трансформаторов за счет ЭДС $E_{ГИТ}$, обеспечивало насыщение их магнитопроводов. Значение суммарного потокоцепления обмоток ВН трансформатора, в момент подключения трехфазного источника, во всех численных экспериментах достигало области насыщения по нижней восходящей ветви петли гистерезиса, $\Psi = 1,1$ о.е. Значение ГИТ задавалось 300 А. Суммарное потокоцепление периодической и знакопостоянной составляющих тока в обмотках трансформатора зависит как от продолжительности протекания, так и от силы знакопостоянного тока, что позволяет, при моделировании, путем увеличения значения ГИТ, ускорить момент достижения состояния насыщения магнитопровода трансформатора.

Результаты расчета БНТ в фазе A повышающего трансформатора $TP1$, полученные на модели с учетом явления гистерезиса без учета (синим цветом) и с учетом влияния ГИТ, 300 А, (красным цветом), представлены на рис. 3.

При учете явления гистерезиса, кратности БНТ с учетом ГИТ получены больше, чем без учета ГИТ, соответственно, на фазах A , B и C с ГИТ: $k_{ТА} = 5,89$, $k_{ТВ} = 1,53$, $k_{ТС} = 1,86$ и без ГИТ: $k_{ТА} = 2,78$, $k_{ТВ} = 1,51$, $k_{ТС} = 1,03$. Под влиянием ГИТ, амплитуды БНТ на фазе A увеличилась в 2 раза, на фазе B увеличилась в 1,1 раза, на фазе C увеличилась в 1,8 раза. Опережающее насыщение стержня фазы A магнитопровода, при включении трансформатора, приводит и к росту БНТ за счет ГИТ на фазе A и к перераспределению магнитных потоков в стержнях фаз B и C , их насыщение увеличивается и, соответственно, увеличиваются кратности БНТ во всех фазах.

При учете только основной кривой намагничивания при протекании ГИТ, кратности БНТ в фазах трансформатора оказались, примерно, на 5% меньше: $k_{ТА} = 5,85$, $k_{ТВ} = 1,52$, $k_{ТС} = 1,85$ по сравнению с БНТ без ГИТ. Незначительная разница в полученных результатах

объясняется тем, что в области сильных магнитных полей, все магнитные домены ориентированы вдоль магнитного поля, и вершины петель гистерезиса сближаются.

Увеличение амплитуды БНТ происходит как при учете гистерезиса, так и при выполнении расчета с учетом основной кривой намагничивания магнитопровода. Протекание ГИТ по обмоткам трансформатора может стать причиной срабатывания ДФЗ и вызвать его отключение.

Наличие ГИТ, при учете гистерезиса, приводит к замедлению, примерно, в два раза, скорости спада пиковых значений БНТ. Продолжительность протекания тока по обмоткам трансформаторов, при значениях, превышающих номинальный более чем в пять раз, может достигать десятков секунд, что негативно скажется на электродинамической и термической стойкости обмоток трансформатора.

Для учета влияния механических деформаций магнитопровода трансформатора, которые могут увеличить его коэрцитивную силу и изменить форму и ширину динамических и частных петель гистерезиса, был выполнен расчет с увеличенной в 2 раза коэрцитивной силой. Были получены результаты, позволяющие сделать вывод, что увеличение коэрцитивной силы магнитопровода не приводит к существенному увеличению кратности БНТ, она возрастает в пределах 5%.

Кроме оценки влияния гистерезиса и ГИТ на амплитудные значения БНТ, анализировался состав гармоник БНТ, определялось отношение амплитуд второй и первой гармоник БНТ, I_2/I_{1ratio} [19], используемого для проверки работы ДФЗ с торможением. Соотношение I_2/I_{1ratio} , рассчитанное без ГИТ с учетом гистерезиса, составило 54,6%, 64,2% и 64% для фаз *A*, *B*, *C* соответственно. При этом с увеличением коэрцитивной силы в 2 раза соотношение I_2/I_{1ratio} возросло в пределах 10%. Учет явления гистерезиса, при расчете пусковых режимов с насыщением трансформатора, вызванным протеканием ГИТ, показывает значительное уменьшение содержания второй гармоники: $I_2/I_{1ratioA} = 6,21\%$, $I_2/I_{1ratioB} = 10,5\%$, $I_2/I_{1ratioC} = 16,2\%$. ГИТ увеличивает индукцию, значительно смещая рабочую точку «вверх» в области насыщения. Чем больше значение индукции, тем соответственно ниже содержание второй гармоники тока. Минимальный параметр срабатывания I_2/I_{1ratio} для работы ДФЗ с торможением обычно принимается 14% и более в зависимости от рекомендаций производителей и нормативных документов. При снижении соотношения I_2/I_{1ratio} в работе ДФЗ при протекании ГИТ могут возникнуть ложные срабатывания.

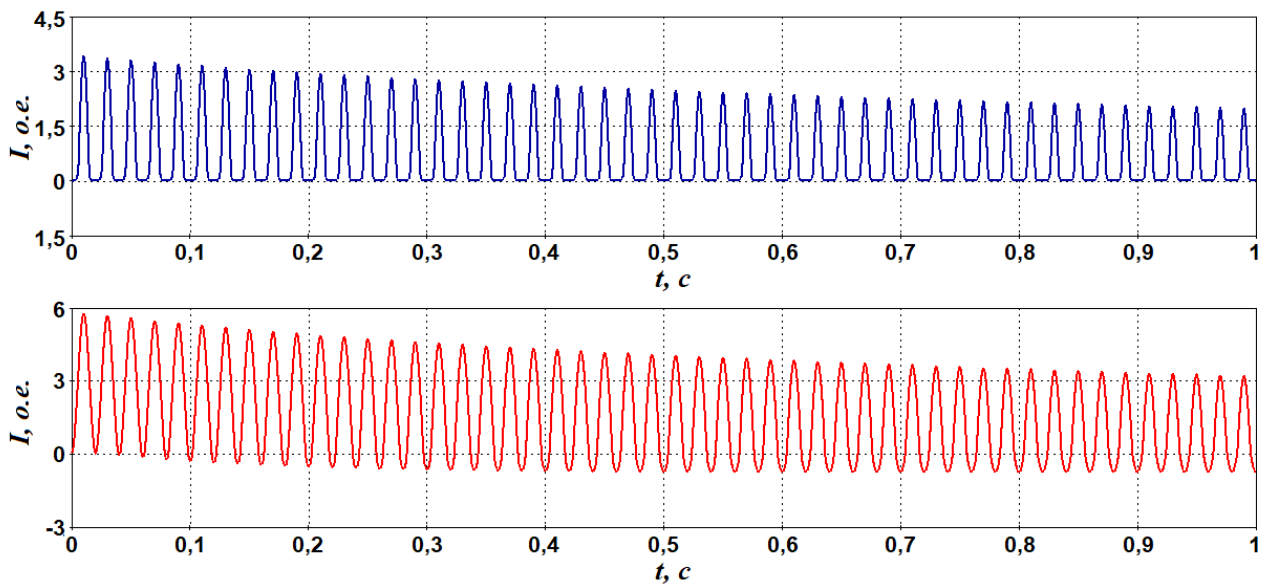


Рис. 3. Мгновенные значения БНТ без учета (синим цветом) и с учетом ГИТ (красным цветом) для фазы A трансформатора, рассчитанные с учетом явления гистерезиса

Помимо анализа изменения амплитуд и содержания второй гармоники БНТ были получены зависимости суммарного потокосцепления Ψ от тока намагничивания i_μ без учета и с учетом явления гистерезиса. При расчете с учетом только основной кривой намагничивания при протекании ГИТ было выявлено увеличение тока намагничивания, в сотни раз превышающее его установившееся значение. Максимальное значение суммарного потокосцепления достигло $\Psi = 2$ о.е., превысив значение уровня «колена» кривой намагничивания. При переходе напряжения через нуль в момент включения без учета ГИТ магнитный поток в стержне фазы A принял положительное направление, а на фазах B и C отрицательное направление. Полярность ГИТ принята исходя из условия обеспечения положительных значений магнитного потока во всех стержнях трансформатора.

Зависимость суммарного потокосцепления Ψ от тока намагничивания i_μ с учетом явления гистерезиса при отсутствии ГИТ изображена на рис. 4 в виде динамических и частных петель гистерезиса для фазы A . На рисунке изображен участок с вершинами частных петель гистерезиса для значений коэрцитивной силы $i_{к.с.} = 0,1$ о.е. (красным цветом) и $i_{к.с.} = 0,2$ о.е. (синим цветом), начиная со второго полупериода. За первый полупериод превысив рабочее значение $\Psi = 1$ о.е., потокосцепление на фазе A по нижней восходящей ветви переходит в область насыщения и достигает своего максимального значения $\Psi = 1,7$ о.е. в первом квадранте (на рисунке не изображено). За второй полупериод, при снижении по верхней нисходящей ветви, потокосцепление переходит в третий и четвертый квадранты, и за следующие периоды постепенно смещается вниз по частным петлям гистерезиса за счет затухания тока намагничивания. При автоматическом отключении трансформатора под

действием защит или после неуспешного АПВ в первый полупериод максимальная остаточная намагниченность $\Psi_{\text{ост}}$ составит 0,23 и 0,37 о.е. для $i_{\text{к.с.}} = 0,1$ о.е. и $i_{\text{к.с.}} = 0,2$ о.е. соответственно. При отключении во второй и следующий полупериоды остаточная намагниченность станет отрицательной, максимальные значения $\Psi_{\text{ост}}$ будут составлять -0,22 до -0,29 о.е. для $i_{\text{к.с.}} = 0,1$ о.е. и $i_{\text{к.с.}} = 0,2$ о.е. соответственно. На фазах B и C остаточная намагниченность при отключении в первый полупериод будет иметь отрицательную полярность, во второй и следующий полупериоды примет положительные значения. Увеличение коэрцитивной силы привело к росту ширины предельной петли гистерезиса, максимальные значения остаточной намагниченности возросли на 0,14 о.е.

Совпадение направлений остаточной намагниченности и потока источника напряжения при последующих включениях трансформатора приведет к увеличению амплитуд БНТ и изменению гармонического состава токов обмоток. Увеличение коэрцитивной силы магнитопровода трансформатора приведет к дополнительному увеличению значений остаточной намагниченности. Выполнение расчетов пусковых процессов трансформаторов, подверженных действию ГИТ без учета явления гистерезиса, с учетом только основной кривой намагничивания, приводит к занижению амплитудных значений БНТ, к занижению продолжительности их протекания и к завышению содержания второй гармоники в БНТ. Выводы о правильности выбора параметров релейных защит, о термической и электродинамической стойкости трансформаторов могут оказаться ошибочными.

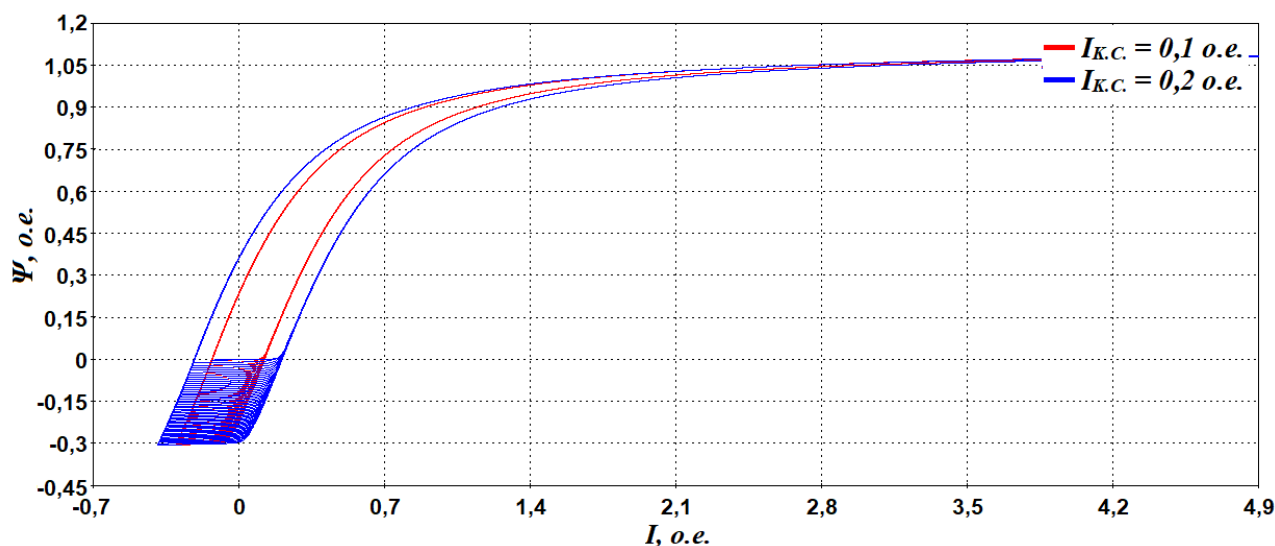


Рис. 4. Динамические и частные петли гистерезиса фазы A без учета ГИТ ($i_{\text{к.с.}} = 0,1$ о.е. — красным цветом, $i_{\text{к.с.}} = 0,2$ о.е. — синим цветом).

Результаты расчета изменения потокосцепления Ψ от тока намагничивания i_{μ} с учетом явления гистерезиса при протекании ГИТ для фазы A показаны на рис. 5. для значений

коэрцитивной силы $i_{к.с.} = 0,1$ о.е. (красным цветом) и $i_{к.с.} = 0,2$ о.е. (синим цветом). Переход в область насыщения за счет ГИТ происходит по нижней восходящей ветви по частным петлям гистерезиса. При включении источника напряжения в момент при $\Psi = 1,1$ о.е., потокосцепление продолжает свой рост в течение первого полупериода до максимального значения, равного $\Psi = 2,4$ о.е. (на рисунке не изображено). Во второй и следующий полупериоды процесс продолжается по частными петлями гистерезиса со смещением вниз за счет затухания тока намагничивания в первом квадранте. Максимальные значения остаточной намагниченности при отключении составят 0,23 и 0,36 о.е. для $i_{к.с.} = 0,1$ о.е. и $i_{к.с.} = 0,2$ о.е. соответственно.

При сравнении с графиком без учета ГИТ видно, что произошло смещение вершин частных петель гистерезиса из второго и третьего квадрантов в первый и частично во второй квадранты, тем самым при любом угле отключения остаточная намагниченность примет положительную полярность.

Рост амплитуд БНТ и изменение гармоник токов может негативно сказаться на работе релейных защит и вызвать их ложное срабатывание. При повторном включении трансформатора, при отсутствии размагничивания магнитопровода, остаточный поток будет суммироваться с потоком источника напряжения, что приведет к увеличению амплитуд БНТ и изменению состава гармоник токов. Повторное включение трансформатора можно провести с таким углом включения, при котором суммарное потокосцепление будет уменьшаться, а не увеличиваться.

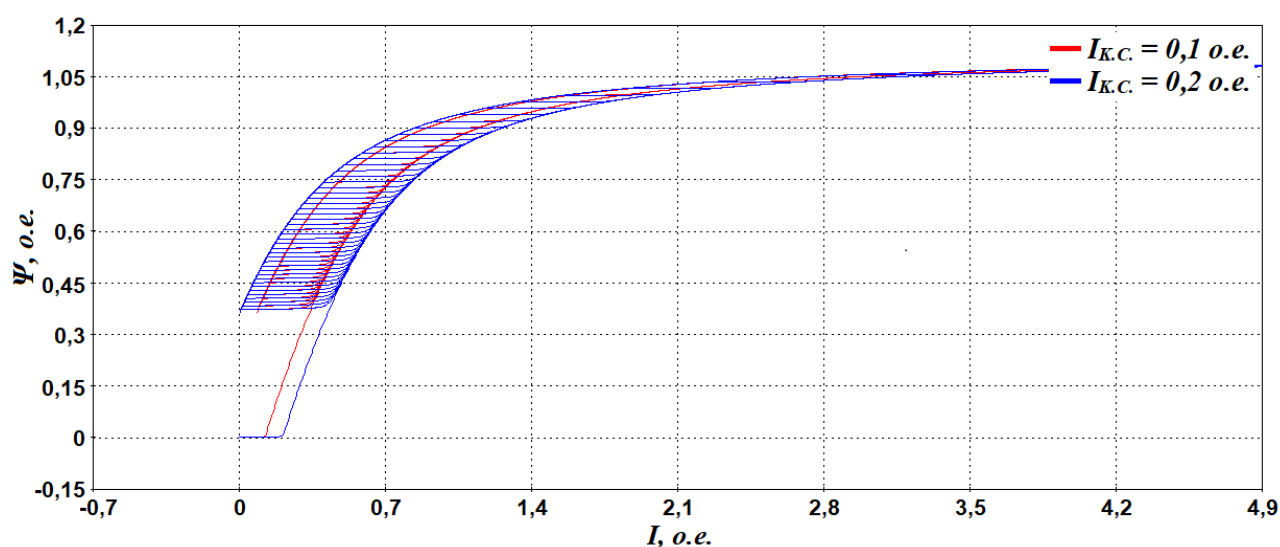


Рис. 5. Динамические и частные петли гистерезиса при включении *TPI* для фазы *A* с учетом ГИТ ($i_{к.с.} = 0,1$ о.е. – красным цветом, $i_{к.с.} = 0,2$ о.е. – синим цветом).

В работе были проведены исследования пусковых режимов трансформатора при отсутствии и протекании знакопостоянных ГИТ. Кратности БНТ с учетом ГИТ увеличились примерно в 2 раза, соотношение гармоник тока I_2/I_{1ratio} уменьшилось до 6%. При учете явления гистерезиса были определены максимальные предполагаемые значения остаточной намагниченности. При протекании ГИТ было выявлено изменение знака остаточной намагниченности, которая при повторных включениях может привести к увеличению суммарного потокоцепления, что вызовет повторный рост кратностей БНТ, и изменению гармонического состава токов. При наличии деформаций в магнитопроводе трансформатора изменяются соотношения гармоник тока и увеличиваются максимальные значения остаточной намагниченности. При изменении момента подключения при меньшей степени насыщения изменение гармонического состава будет изменяться за счет смещения рабочей точки на кривой намагничивания.

Явление протекания ГИТ может привести к ложным срабатываниям ДФЗ, а также негативно отразиться на термической и электродинамической стойкости обмоток трансформатора.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что явление протекания знакопостоянного тока необходимо принимать во внимание для обеспечения надежной работы релейных защит и сети в целом. Исследования воздействия ГИТ на работу и эксплуатацию электроэнергетических систем, определения уровня токов, превышение которых становится опасным для трансформаторов и релейных защит, максимально возможные ГИТ по территориям, и заблаговременное выявление его негативного воздействия требует совместных исследований специалистами из области электроэнергетики и геофизики.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 16-17-00121 «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»

Список литературы:

1. Boteler D. Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems // J. Space Weather Space Climate. 2014. V. 4. Art. A21. doi:10.1051/swsc/2014018.

2. Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях. Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Кузнецов В.А. Гелиогеографические исследования, выпуск 5, 115-123, 2013.
3. Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А. Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтральных автотрансформаторов // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 4. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012.
4. Pulkkinen, A., Thomson, A., Clarke, E., and McKay, A.: April 2000 geomagnetic storm: ionospheric drivers of large geomagnetically induced currents, *Ann. Geophys.*, 21, 709-717, <https://doi.org/10.5194/angeo-21-709-2003>, 2003.
5. Wik, M., A. Viljanen, R. Pirjola, A. Pulkkinen, P. Wintoft, and H. Lundstedt (2008), Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden, *Space Weather*, 6, S07005, doi:10.1029/2007SW000343.
6. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И., Модели и методы магнитотеллурики, Научный мир, Москва, 2009 г., 680 стр.
7. Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П. Геоиндуцированные токи и космическая погода: параметры РiЗ пульсаций и вероятности появления надпороговых значений производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля. *Физика Земли*. 2018. № 5. С. 89-103.
8. Ягова Н.В., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н. Частоты появления экстремальных значений производных по времени геомагнитного поля, потенциально опасных для промышленных электрических сетей, по данным многолетних наблюдений на сети IMAGE. В сборнике: Гелиогеофизические исследования в Арктике Сборник трудов конференции. Полярный геофизический институт. 2016. С. 84-86.
9. Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // *Space Weather*. V. 3. 2005. S08C01.
10. Document C-15. Procedures for solar magnetic disturbances, which affect electric power systems. NPCC Inc. January 11, 2007.
11. ГОСТ 16110-82. Трансформаторы силовые. Термины и определения
12. ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения
13. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. Изд. 2-е, переаб. М., «Энергия», 1974. – 240 с.
14. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения. Под ред. чл.-корр. РАН А.Ф.Дьякова, 2005. – 273 с.

15. A method to identify inrush currents in power transformers protection based on the differential current gradient. Raidson J. Alencar, Ubiratan H. Bezerra, Andre M. Ferreira. Electric power system research 111 (2014) 78-84
16. Jing Na, Qiang Chen and Xuemei Ren. Adaptive identification and control of uncertain systems with non-smooth dynamics. A volume in emerging methodologies and applications in modelling. 2018, p. 249-256.
17. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов, и факультетов. 2-е издание, стереотипное. – М., ООО «ТИД «АРИС», 2010. – 520 с.
18. Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные и методические материалы для выполнения квалификационных работ: учебно-справочное пособие для вузов / И.П. Крючков, М.В. Пираторов, В.А. Старшинов; под ред. И.П.Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 138 с. Ил
19. СТО 56947007-29.120.70.98-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства ООО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы».

References:

1. Boteler D. Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems // J. Space Weather Space Climate. 2014. V. 4. Art. A21. doi:10.1051/swsc/2014018.
2. Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Kuznetsov V.A. Reducing the risk of accidents in electric power systems at the geomagnetic storms. Geliogeograficheskie issledovaniya, Vypusk 5, 2013. pp. 115-123.
3. Selivanov V.N., Barannik M.B., Danilin A.N., Kolobov V.V., Sakharov Ya.A. A study of autotransformer neutral harmonic currents under geomagnetic disturbance conditions. Trudy KNC RAN. Energetika. Vypusk 4. Apatity: Izd-vo Kolskogo nauchnogo centra RAN, 2012.
4. Pulkkinen, A., Thomson, A., Clarke, E., and McKay, A.: April 2000 geomagnetic storm: ionospheric drivers of large geomagnetically induced currents, Ann. Geophys., 21, 709-717, <https://doi.org/10.5194/angeo-21-709-2003>, 2003.
5. Wik, M., A. Viljanen, R. Pirjola, A. Pulkkinen, P. Wintoft, and H. Lundstedt (2008), Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden, Space Weather, 6, S07005, doi:10.1029/2007SW000343.

6. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Modeli i metody magnitotelluriki. – in Russ. (Models and Methods of magnetotellurics). Moscow, Nauchnyj Mir, 2009. 680 p.
7. Yagova N.V., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Lkhamdondog A.D., Gusev Y.P. Geomagnetically induced currents and space weather: pi3 pulsations and extreme values of time derivatives of the geomagnetic field's horizontal components. Physics of the Solid Earth. 2018. T. 54. № 5. pp. 749-763.
8. Yagova, N.V., Lkhamdondog, A.D., Gusev, Yu.P., Pilipenko, V.A., and Fedorov, E.N., Frequencies of occurrence of the extreme values in the time derivatives of the geomagnetic field which are potentially hazardous for industrial electric networks according to long-term observations at the IMAGE network, Trudy konferentsii Geliogeofizicheskie issledovaniya v Arktike (Proc. Conf. Heliogeophysical Studies in the Arctic), Murmansk, 2016.
9. Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // Space Weather. V. 3. 2005. S08C01.
10. Document C-15. Procedures for solar magnetic disturbances, which affect electric power systems. NPCC Inc. January 11, 2007.
11. GOST 16110-82. Transformatory silovye. Terminy i opredeleniya. – in. Russ. (Power transformers. Terms and definitions).
12. GOST 19693-74. Materialy magnitnye. Terminy i opredeleniya. – in Russ. (Magnetic materials. Terms and definitions).
13. Druzhinin V.V. Magnitnye svojstva elektrotexnicheskoj stali. – in Russ. (Magnetic properties of electrical steel). Moscow, Energiya, 1974. 240 p.
14. Cigler G. Cifrovye ustrojstva differencialnoj zashhity. principy i oblast primeneniya. in Russ. (Digital devices of differential protection. Principles and scope). Pod redakciej chl.-korr. RAN A.F.Dyakova, 2005. 273 p.
15. A method to identify inrush currents in power transformers protection based on the differential current gradient. Raidson J. Alencar, Ubiratan H. Bezerra, Andre M. Ferreira. Electric power system research 111 (2014) pp. 78-84.
16. Jing Na, Qiang Chen and Xuemei Ren. Adaptive identification and control of uncertain systems with non-smooth dynamics. A volume in emerging methodologies and applications in modelling. 2018, pp. 249-256.
17. Ulyanov S.A. Elektromagnitnye perexodnye processy v elektricheskix sistemax. uchebnik dlya elektrotexnicheskix i energeticheskix vuzov, i fakultetov. – in Russ. (Electromagnetic transients in electrical systems. Textbook for electrical and energy universities and faculties. 2nd edition, stereotypical). Moscow, OOO «TID «ARIS», 2010. 520 p.

18. Kryuchkov I.P. Elektricheskaya chast elektrostancij i podstancij. spravochnye i metodicheskie materialy dlya vypolneniya kvalifikacionnyx rabot: uchebno-spravochnoe posobie dlya vuzov / I.P. Kryuchkov, M.V. Piratorov, V.A. Starshinov; pod red. I.P.Kryuchkova. – in Russ. (The electrical part of power plants and substations. Reference and training materials to perform qualification works: a training manual for universities.). Moscow, Izdatelskij dom MEI, 2015. 138 p.

19. STO 56947007-29.120.70.98-2011. Metodicheskie ukazaniya po vyboru parametrov srbatyvaniya ustrojstv RZA oborudovaniya podstancij proizvodstva OOO «ABB Silovye I Avtomatizirovannye Sistemy». – in Russ. (Methodology guidelines for choosing relay protection and automation devices the operating values of substations equipment manufactured by ABB Power and Automated Systems LLC).