

Влияние знакопостоянного тока на процессы намагничивания трехфазных силовых трансформаторов

ГУСЕВ Ю.П., ЛХАМДОНДОГ А.Д., МОНАКОВ Ю.В., ЯГОВА Н.В.

Представлены результаты исследования влияния токов со знакопостоянными составляющими, протекающих по обмоткам силовых трансформаторов, на переходные процессы, вызванные короткими замыканиями и оперативными переключениями в электроэнергетической системе. Исследования процессов намагничивания при протекании знакопостоянных токов были проведены на расчетной модели в программной среде EMTP-RV (PowerSys, Франция). Верификация модели проведена путем подтверждения паспортных данных трансформатора и на основе натурных испытаний на трехфазном силовом трансформаторе марки ТЛС-25/6. Определена вольт-секундная характеристика намагничивания силового трансформатора знакопостоянным током.

Ключевые слова: силовой трансформатор, намагничивание, насыщение магнитопровода, знакопостоянный ток, гистерезис, математическое моделирование

При расчете коротких замыканий (КЗ) в высоковольтных электрических сетях в соответствии с рекомендациями пока еще действующих нормативных документов постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока принимается равной 0,045 с [1]. Новые стандарты МЭК для сетевых присоединений рекомендуют использовать в 2 раза большее значение постоянной времени — 0,09 с [2]. При подпитке КЗ электрически близкими синхронными генераторами в токе КЗ может присутствовать аperiodическая составляющая с еще более медленно затухающей постоянной времени 0,1÷0,2 с. В сочетании с быстро затухающей периодической составляющей, характерной для мощных современных генераторов, медленно затухающая аperiodическая составляющая становится причиной задержки прохождения мгновенных значений тока КЗ через ноль на десятки миллисекунд. Этот процесс, характеризующийся протеканием по обмоткам трансформаторов в течение нескольких периодов знакопостоянного тока, является новым для электрических сетей и может приводить к насыщению магнитопроводов силовых трансформаторов и трансформаторов тока. Еще одним источником знакопостоянного тока являются геоиндуцированные токи (ГИТ). Они возникают в контуре, созданном линией электропередачи высокого напряжения, трансформаторами с заземленной нейтралью и землей. Причиной появления ГИТ являются геомагнитные бури и колебания магнитного поля Земли [3].

Под воздействием знакопостоянного тока магнитопровод трансформатора может насыщаться. Из-за этого возникает риск ложного срабатывания или отказа релейной защиты [4]. В статье приведена вольт-секундная характеристика, полученная в

результате расчетно-теоретического исследования, устанавливающая связь между временем насыщения трансформатора и значениями знакопостоянного напряжения, прикладываемого к его обмоткам. В ранее опубликованных работах [5, 6] для исследования переходных процессов в трехфазных электрических цепях с трансформаторами, работающими с насыщающимися магнитопроводами, предлагалось использовать математические модели, учитывающие только начальную кривую намагничивания. Такие модели не полностью отражают нелинейности реальных характеристик намагничивания, например, явление гистерезиса.

В отличие от ранее выполненных работ [7, 8], направленных на исследование переходных процессов в цепях с однофазными и трехфазными трансформаторами без учета влияния синфазных знакопостоянных токов, в статье учитывались частные петли гистерезиса. Учет частных петель гистерезиса позволяет повысить точность расчетов переходных процессов с синфазными знакопостоянными токами в обмотках трехфазных трансформаторов. Требования к полноте учета процессов намагничивания магнитопроводов силовых и измерительных трансформаторов при воздействии синфазных знакопостоянных токов в настоящее время не определены.

Важной особенностью исследуемых процессов намагничивания является их зависимость от предыстории магнитопровода трансформатора, определяемая остаточной намагниченностью. Физически это объясняется смещением границ доменов (областей самопроизвольного намагничивания) стали магнитопровода и их поворотом, зависящих от амплитуды и продолжительности воздействия напряжения на обмотки трансформатора. Для мо-

делирования процессов с частными петлями гистерезиса был использован программный комплекс ЕМТР-RV. Использованная модель основана на модифицированной теории гистерезиса Прейзаха, приемлемость которой подтверждена многочисленными исследованиями [9].

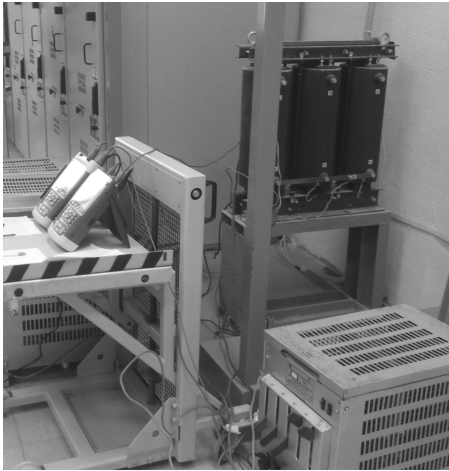


Рис. 1. Экспериментальная установка, использованная для проверки модели

Работоспособность созданной модели проверена на основе расчета параметров реального трансформатора типа ТЛС-25/6 (рис. 1). Паспортные данные трансформатора: $S_{\text{НОМ}} = 25$ кВА; $U_{1\text{НОМ}}/U_{2\text{НОМ}} = 6000/400$ В; $I_{1\text{НОМ}}/I_{2\text{НОМ}} = 2,41/36,1$ А; $P_{\text{ХХ}} = 150$ Вт; $I_{\text{ХХ}} = 2\%$; $P_{\text{К}} = 470$ Вт; $U_{\text{К}} = 2,5\%$.

В проведенном исследовании магнитное поле в магнитопроводе трансформатора создавалось импульсами постоянного напряжения, прикладываемого к обмотке высшего напряжения (ВН), соединенной в звезду Y_0 . Трансформатор работал в режиме холостого хода, обмотка низшего напряжения (НН) оставалась разомкнутой, ток в ней отсутствовал. Это позволило пренебречь влиянием на переходный процесс индуктивностей рассеяния обмоток ВН и НН, так как параметры переходных процессов определялись, в основном, значениями индуктивности ветвей намагничивания фазных обмоток, которые многократно превосходят значения индуктивности рассеяния фазных обмоток.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока обмотки ВН при подаче на нее постоянного напряжения. На верхнем графике изображен ток, полученный с помощью экспериментальной установки, на нижнем графике ток, рассчитанный на модели в ЕМТР-RV. Амплитуды установившихся значений тока составили на экспериментальной установке и расчетной модели 3,40 и 3,22 А соответственно. Постоянные времена нарастания тока для экспериментальных и расчетных значений 45 и 49 мс, затухания — 116 и 100 мс соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что модель может применяться при исследовании процессов намагничивания трансформаторов.

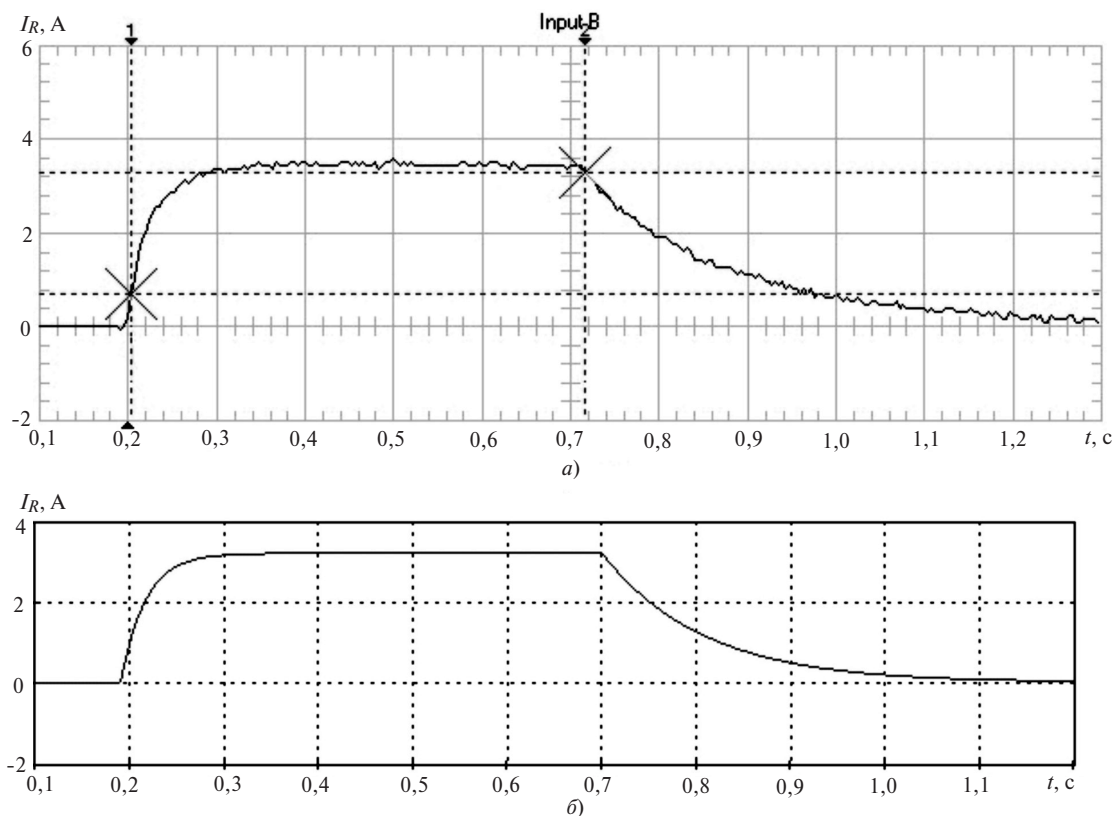


Рис. 2. Ток обмотки ВН при подаче на нее импульса постоянного напряжения на экспериментальной установке (а) и расчетной модели (б)

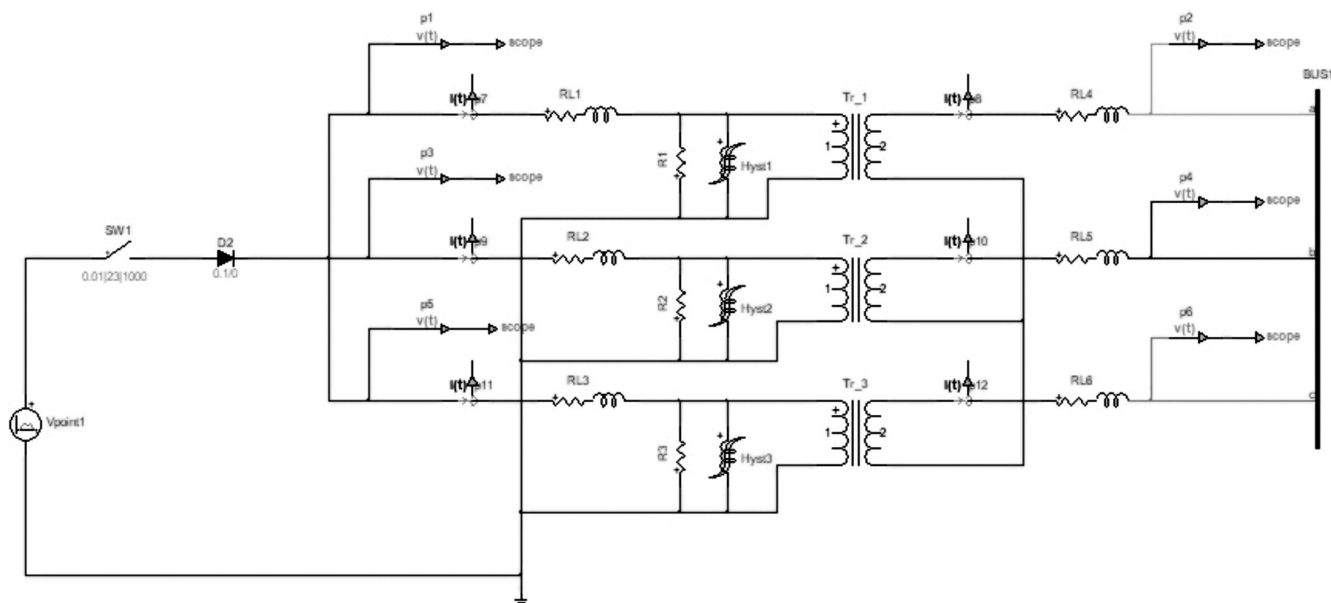


Рис. 3. Структурная схема расчетной модели в программной среде EMTP-RV

Структурная схема модели силового трансформатора с подключением источника к обмотке ВН изображена на рис. 3. Расчетная модель параметризована с использованием вебер-амперной начальной кривой намагничивания трансформаторной стали марки Э330 (3414), рис. 4 [10]. Переход в область насыщения трансформатора происходит при превышении значения потокосцепления $\Psi=18$ Вб. При этом на начальной кривой намагничивания рабочая точка переходит в область так называемого «колена кривой».

Параметры, необходимые для расчета предельной и частных (несимметричных) петель гистерезиса в модели, рассчитывались по значениям начальной кривой намагничивания и коэрцитивной силы 30 А/м [11, 12]. Верификация модели была проведена на основе сопоставления паспортных данных трансформатора с результатами расчета режимов холостого хода и КЗ. Сопоставление расчетных и опытных данных по коэффициенту трансформации, потерям КЗ и потерям холостого хода, кратности броска тока включения позволило подтвердить приемлемую для дальнейших исследований погрешность, не превышающую 15%. Здесь и далее результаты приводятся только для одной фазы А. На остальных фазах результаты расчетов аналогичны.

В процессе расчетно-теоретического исследования к обмотке ВН через нейтраль трансформатора был подключен источник постоянного напряжения, позволяющий подавать напряжение в виде серии импульсов различной продолжительности, полярности и амплитуды. Обмотка НН была разомкнута, ток в ней отсутствовал. Диод использовался для фиксации потокосцепления при нулевом токе, что позволило избежать перемагничивания магни-

топровода трансформатора отрицательными импульсами напряжения и в то же время обеспечивало возврат магнитной системы к начальным условиям. Использование серии импульсов позволило получить в одном расчете данные для построения зависимости времени насыщения от напряжения, прикладываемого к обмотке. Использование в качестве тестовых сигналов импульсов напряжения, а не тока обусловлено зависимостью токов в обмотках трансформатора не только от внешних источников, но и от параметров трансформатора, а напряжение, в основном, зависит от внешних факторов и поэтому легче контролируется. На рис. 5 показана форма прикладываемых импульсов. Амплитуда в подаваемой серии импульсов увеличивалась с шагом в 5 В для положительных импульсов и поддерживалась неизменной, равной -50 В для отрицательных. Продолжительность положительных и отрицательных импульсов напряжения составляла 1 с.

Параметры импульсов выбраны из условия определения зависимости времени, необходимого для

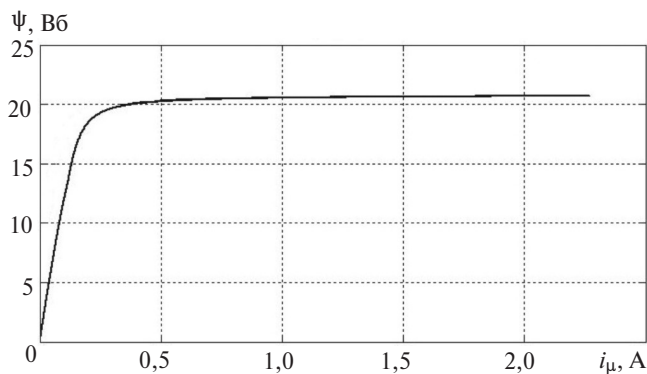


Рис. 4. Вебер-амперная начальная кривая намагничивания трансформатора ТЛС-25/6

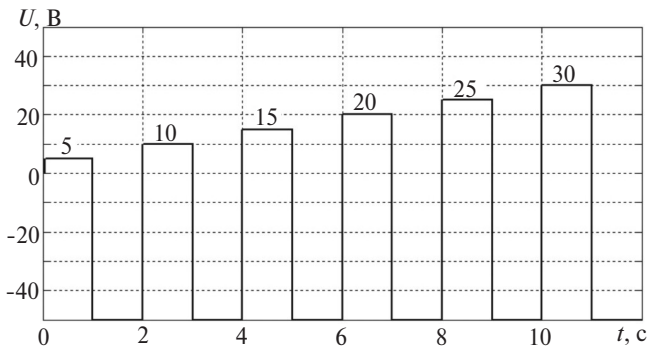


Рис. 5. Форма кривой напряжения источника

насыщения магнитопровода трансформатора от амплитуды прикладываемого напряжения. Импульсами отрицательной полярности обеспечивалось размагничивание магнитопровода трансформатора. С помощью диода ток отрицательной полярности прерывается, обеспечивая одинаковые значения напряженности внешнего магнитного поля, создаваемого током в обмотках трансформатора в момент, предшествующий подаче очередного положительного импульса напряжения.

Во время действия отрицательных импульсов напряжения значение остаточной намагниченности снижается до значения, соответствующего предыдущему положительному импульсу напряжения при условии отсутствия размагничивания током отрицательного импульса, чем и было обусловлено подключение диода. Выполнение условия отсутствия размагничивания отрицательным током показано на рис. 6, где изображен ток в обмотке ВН трансформатора. После четвертого импульса напряжения ток резко увеличился.

Рис. 7 иллюстрирует появление остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора. Под воздействием третьего и последующих импульсов напряжения после обнуления тока в обмотке ВН в магнитопроводе сохраняется ненулевой остаточный магнитный поток значением 0,35÷6,15 Вб. После первых двух импульсов обеспечивался возврат магнитной системы к предшествующему состоянию без существенной остаточной намагниченности.

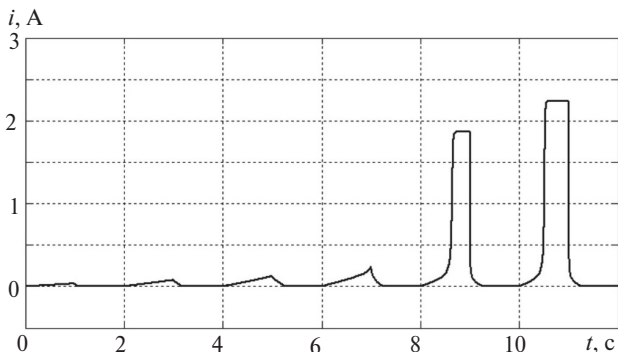


Рис. 6. Ток обмотки ВН трансформатора при подаче серии импульсов напряжения

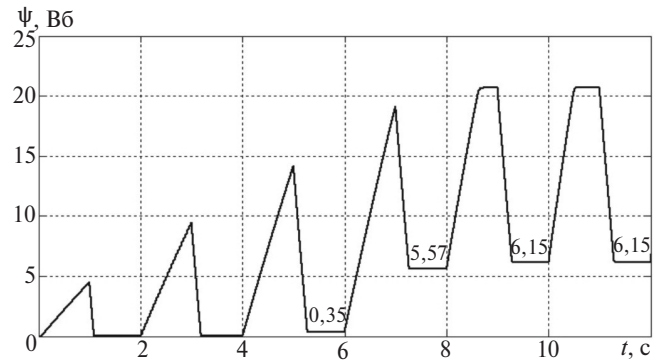


Рис. 7. Потокосцепление обмотки ВН трансформатора, изменяющееся под воздействием импульсов напряжения, отражающее переход магнитопровода в режим насыщения и появление остаточной намагниченности

При достижении насыщения, а затем при возврате к предшествующему состоянию во время бестоковой паузы остаточная намагниченность была равна 6,15 Вб, что составляет 30% рабочего диапазона значений магнитного потока.

На рис. 8 показаны частные петли гистерезиса на основе зависимости изменения потокосцепления от тока намагничивания. Характер данной кривой зависит от заданных характеристик материала магнитопровода трансформатора. Воздействие импульсами напряжения позволяет рассчитать частные несимметричные петли гистерезиса. Из рис. 8 видно, что трансформатор достигает состояния насыщения, превысив значение «колена кривой», и получает остаточную намагниченность, равную 6,15 Вб. Отсутствие размагничивания отрицательной полувольтной позволило получить петли гистерезиса только в первом квадранте. Изменение потокосцепления позволит определить уровень остаточной намагниченности в пределах заданной погрешности.

Полученные результаты показывают, что с увеличением напряжения продолжительность его действия, необходимая для насыщения магнитопровода трансформатора, уменьшается. На основе полученных результатов для трансформатора марки ТЛС-25/6 была получена вольт-секундная характе-

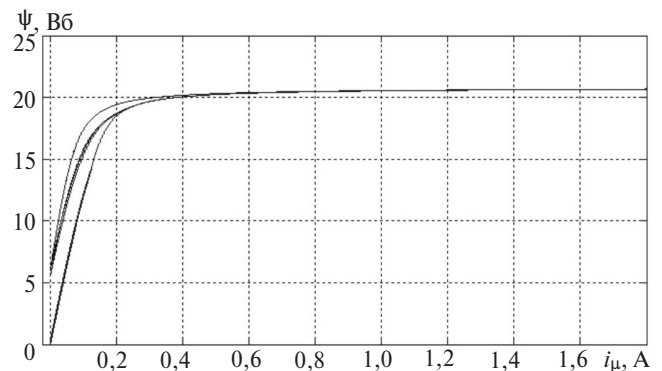


Рис. 8. Частные несимметричные петли гистерезиса на основе зависимости потокосцепления от тока намагничивания

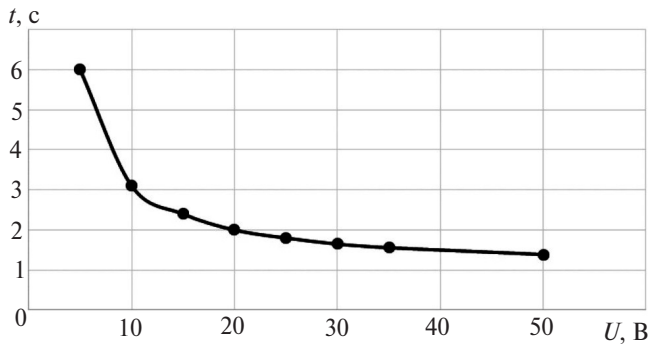


Рис. 9. Вольт-секундная характеристика насыщения трансформатора

ристика (рис. 9), которая наглядно показывает пороговые уровни напряжения и продолжительность его воздействия. При приближении магнитопровода к состоянию насыщения уровень его остаточной намагниченности повышается.

В большинстве инженерных расчетов явление гистерезиса в магнитопроводах не учитывается. При использовании статической начальной кривой намагничивания учетом остаточной намагниченности пренебрегают, что отрицательно влияет на результаты анализа работы релейных защит и автоматики.

Исследования процессов намагничивания на модели силового трехстержневого трансформатора показали, что при воздействии синфазного знакопостоянного тока в зависимости от его амплитуды и продолжительности трансформатор может за доли или единицы секунд достигать состояния насыщения. Насыщение магнитопровода приводит к изменению гармонического состава токов в обмотках трансформатора, что может привести к сбоям в работе релейных защит и снизить надежность работы энергосистемы.

Разработанная расчетная модель в дальнейшем может использоваться для оценки влияния знакопостоянных токов, обусловленных магнитными бурями или наличием апериодических составляющих, на работу релейных защит силовых трансформаторов при коротких замыканиях и при пусковых режимах трансформаторов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
- IEC/IEEE 62271-37-013. International standard. High-voltage switchgear and controlgear – Part 37-013: Alternating-current generator circuit-breakers.
- 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. Материалы Всероссийской конф. «Гелиогеофизические исследования в Арктике». Мурманск, 19–23 сентября 2016.
- Gircis R., Vedante K., Gramm K. Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems, CIGRE, A2-304, 2012.
- Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов. — Вектор науки ТГУ, 2012, № 3 (21).
- Syafruddin H., Soib T., Risnidar C., Siti R.M. Effect of DC bias on magnetization current waveforms of single phase power transformer. — IEEE Intern. power engineering and optimization conf., Melaka, Malaysia, 6–7 June 2012.
- Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы. — Известия РАН. Энергетика, 2009, № 2.
- Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю., Тарчуткин А.Л. Топологические модели трансформатора. — Электричество, 2012, № 10, с. 33–42.
- James G. Frame, Narendra Mohan, Tsu-huei Liu. Hysteresis modeling in an electro-magnetic transients program. — IEEE Trans. on power apparatus and systems, 1982, vol. PAS-101, No. 9.
- Denetiere S., Mahseredjian J., Martinez M., Rioual M. and Xemard A. On the implementation of a hysteretic reactor model in EMTP. — Proc. of the 5th Intern. Conf. on Power Systems Transients, New Orleans, USA. September 28th – October 2nd, 2003.
- Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.
- Силовые трансформаторы. Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.

[21.01.2019]

А в т о р ы: Гусев Юрий Павлович — кандидат техн. наук, заведующий кафедрой «Электрические станции» НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1984 г.

Лхамдондог Анна Даваевна — аспирант, ассистент кафедры «Электрические станции» НИУ «МЭИ».

Монаков Юрий Викторович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» НИУ МЭИ, диссертацию защитил в 2013 г.

Ягова Надежда Викторовна — кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, диссертацию защитила в 1993 г.

The Influence of a Constant-Sign Current on the Magnetization Processes in Three-Phase Power Transformers

GUSEV Yury P. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Head of Sub-Faculty, Cand. Sci. (Eng.)

LKHAMDONDOG Anna D. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Post-Graduate Student

MONAKOV Yury V. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Senior Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)

YAGOVA Nadezhda V. (*Institute of Physics of the Earth named O. Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences*) — Senior Research Scientist, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

The article presents the results of an investigation aimed at determining the influence of currents containing constant-sign components flowing through the windings of power transformers on the transients triggered by short-circuit faults and routine switching operations in the electric power system. The investigations of magnetization processes under the conditions of constant-sign currents were carried out using an analysis model in the EMTP-RV software environment developed by PowerSys, France. The model was verified by confirming the transformer nameplate data and based on full-scale tests carried out on the TLS-25/6 three-phase power transformer. The power transformer voltage-time curve of magnetization by a constant-sign current has been determined.

Key words: power transformer, magnetization, magnetic core saturation, constant-sign current, hysteresis, mathematical modeling

REFERENCES

- GOST R 52735-2007.** *Kороткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ* (Short-circuits in electrical installations. Calculation methods in alternating current electrical installations with voltage above 1 kV).
- IEC/IEEE 62271-37-013.** International standard. High-voltage switchgear and controlgear — Part 37-013: Alternating-current generator circuit-breakers.
- Yagova N.V., Lkhamdondog A.D., Gusev Yu.P., Pilipenko V.A., 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 konf. «Geliogeofizicheskie issledovaniya v Arktike»* (Proc. Conf. Heliogeophysical Studies in the Arctic), Murmansk, 2016.
- Gircis R., Vedante K., Gramm K.** Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems, CIGRE, A2-304, 2012.
- Vakhnina V.V., Chernenko A.N., Kuznetsov V.A.** *Vektor nauki TGU — in Russ. (Vector of Science TGU)*, 2012, No. 3(21).
- Syafuruddin H., Soib T., Risnidar C., Siti R.M.** Effect of DC bias on magnetization current waveforms of single phase power transformer. IEEE Intern. power engineering and optimization conf. (PEOCO2012), Melaka, Malaysia, 6–7 June 2012.
- Dmitriev M.V., Evdokunin G.A.** *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika — in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2009. No. 2.
- Zirka S.Ye., Moroz Yu.I., Moroz Ye.Yu., Tarchutkin A.L.** *Elektrichestvo. — in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 10, pp. 33–42.
- James G. Frame, Narendra Mohan, Tsu-huei Liu.** Hysteresis modeling in an electro-magnetic transients program. — IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-101, No. 9, September 1982.
- Denetiere S., Mahseredjian J., Martinez M., Rioual M. and Xemard A.** On the implementation of a hysteretic reactor model in EMTP. Proc. of the 5th Intern. Conf. on Power Systems Transients, September 28th — October 2, 2003, New Orleans, USA.
- Leytes L.V.** *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* (Electromagnetic calculations of transformers and reactors). Moscow, Energiya, 1981.
- Siloye transformatory.** *Spravochnaya kniga / Pod red. S.D. Lizunova i A.K. Lokhanina* (Power transformers Certificate book/Edit. by S.D. Lizunov and A.K. Lokhanin). Moscow, Energoizdat, 2004, 616 p.