

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

© 2014

В.В. Вахнина, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»
А.Н. Черненко, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: система электроснабжения; силовой трансформатор; геоиндуцированные токи; высшие гармонические тока и напряжения.

Аннотация: Рассмотрена причинно-следственная связь возникновения геоиндуцированных токов и искажения кривых тока и напряжения в электрической сети. Показано, что источником высших гармонических тока и напряжения при воздействии геоиндуцированных токов на систему электроснабжения при геомагнитных бурях является контур намагничивания силового трансформатора. Приведены результаты компьютерного моделирования в виде осциллограмм тока и напряжения, а также линейчатых спектров коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения в точке передачи электрической энергии для двух расчетных моделей подстанций системы электроснабжения с «длинной» и «короткой» питающей воздушной линией 110 кВ при различных коэффициентах загрузки силовых трансформаторов и напряженностях геоэлектрического поля 6–20 В/км. От шин низкого напряжения 6 кВ подстанций запитаны высоковольтные синхронные электрические двигатели.

Показано, что на несинусоидальность тока и напряжения в точке передачи электрической энергии наиболее сильное влияние оказывают параметры системы электроснабжения: например, увеличение длин воздушных линий приводит к усилению высших гармонических тока и напряжения. Интенсивность геоэлектрического поля, изменение коэффициента загрузки силового трансформатора оказывают влияние на несинусоидальность тока и напряжения в меньшей степени. Установлено, что при геомагнитных бурях суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения обмотки низкого напряжения силового трансформатора может превысить значения, нормируемые ГОСТ 32144-2013 для сетей 6–25 кВ.

ВВЕДЕНИЕ

При геомагнитных бурях при протекании геоиндуцированных токов (ГИТ) по заземленным высоковольтным обмоткам силовых трансформаторов (СТ) систем электроснабжения (СЭС) происходит насыщение их магнитной системы, ток намагничивания становится несинусоидальным с ярко выраженной полупериодной несимметрией и его амплитудное значение многократно превышает ток холостого хода силового трансформатора. В кривой тока намагничивания присутствуют постоянная, четные и нечетные гармонические составляющие [1]. Высшие гармонические составляющие распространяются по цепям, связанным с силовым трансформатором электрической или магнитной связью, приводят к искажению кривых тока и напряжения электрической сети [2]. Контур намагничивания силового трансформатора во время геомагнитных бурь становится источником высших гармонических тока и напряжения для всей электрической сети и моделируется нелинейным сопротивлением. В [3] показано, что спектр тока намагничивания силового трансформатора зависит от характера нагрузки, степени насыщения магнитной системы и схемы соединения обмоток. В свою очередь, в [4] показано, что при геомагнитных бурях степень насыщения магнитной системы силового трансформатора определяет величина и продолжительность воздействия ГИТ, поэтому при анализе гармонического состава тока намагничивания силового трансформатора необходимо учитывать влияние ГИТ, который определяется параметрами геоэлектрического поля и параметрами электрической сети.

Следовательно, при геомагнитных бурях параметры СЭС и интенсивность геоэлектрического поля могут

наложить ограничения на обеспечение условий электромагнитной совместимости потребителей с системой электроснабжения по несинусоидальности напряжения в точке передачи электрической энергии с учетом требований ГОСТ 32144-2013 [5].

ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ УСЛОВИЙ И РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

При анализе влияния геоиндуцированных токов на режимы работы систем электроснабжения наибольший интерес представляют СЭС с мощной электродвигательной нагрузкой, т. к. [6]: электрические двигатели являются самыми распространенными промышленными потребителями электрической энергии; единичная мощность электрических двигателей постоянно увеличивается и достигает в настоящее время 25 МВт; нарушение динамической устойчивости синхронных электрических двигателей при кратковременных снижениях напряжения – наиболее распространенная причина срыва технологических процессов непрерывных производств; самозапуск всех электрических двигателей в СЭС промышленного предприятия, как правило, не осуществим, поэтому необходимо управление режимом самозапуска.

Расчеты выполнены для двух подстанций СЭС г.о. Тольятти: подстанции «КуйбышевАзот» и «Елховка», от шин низкого напряжения 6 кВ которых запитаны высоковольтные синхронные электрические двигатели общей суммарной мощностью 84,3 МВт и 84,8 МВт соответственно.

На подстанции «КуйбышевАзот» установлены два силовых трансформатора типа ТРДН-63000/115/6,3/6,3. Трансформатор Т1 получает питание через воздушную

линию (ВЛ) 110 кВ «АЗОТ-1» длиной 11,47 км от открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ подстанции «Васильевская», трансформатор Т2 – через ВЛ 110 кВ «АЗОТ-2» длиной 1,74 км от ОРУ 110 кВ «ТоТЭЦ» (подстанция с «короткой» питающей линией).

На подстанции «Елховка» установлены два силовых трансформатора типа ТРДН-63000/115/6,3/6,3. Трансформаторы Т1 и Т2 получают питание через двухцепную воздушную линию ВЛ-110 кВ «Елховка-1,2» длиной 54,4 км от ОРУ 110 кВ подстанции «АЗОТ» (подстанция с «длинной» питающей линией).

На рис. 1 приведена упрощенная принципиальная схема подстанции «Елховка».

В расчетных моделях принято:

- форма импульса напряженности геоэлектрического поля при геомагнитной буре в расчетной модели принята типичной [7] с максимальными значениями 6, 10, 15, 20 В/км;
- продолжительность воздействия импульса на СЭС составляет 1740 с;
- направление горизонтальной компоненты напряженности геоэлектрического поля $E_{(x,y)}$ при компьютерном моделировании принято запад – восток;
- расчеты мгновенных значений токов и напряжений в расчетных моделях выполнены для момента времени 1290 с – времени, когда значения напряженности геоэлектрического поля принимают максимальные значения;
- коэффициент загрузки силовых трансформаторов подстанций принят равным 0,7.

РАСЧЕТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Результаты компьютерного моделирования – осциллограммы напряжения обмотки низкого напряжения (НН) силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка» приведены на рис. 2. На рис. 3 приведены линейчатые спектры коэффициентов от 2-й до 20-й гармонических составляющих напряжения обмотки НН силового трансформатора Т1.

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения определялись по формуле:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100,$$

где $U_{(1)}$ – напряжение основной гармонической составляющей; $U_{(n)}$ – напряжение n -й гармонической составляющей.

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения определялось по формуле:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100.$$

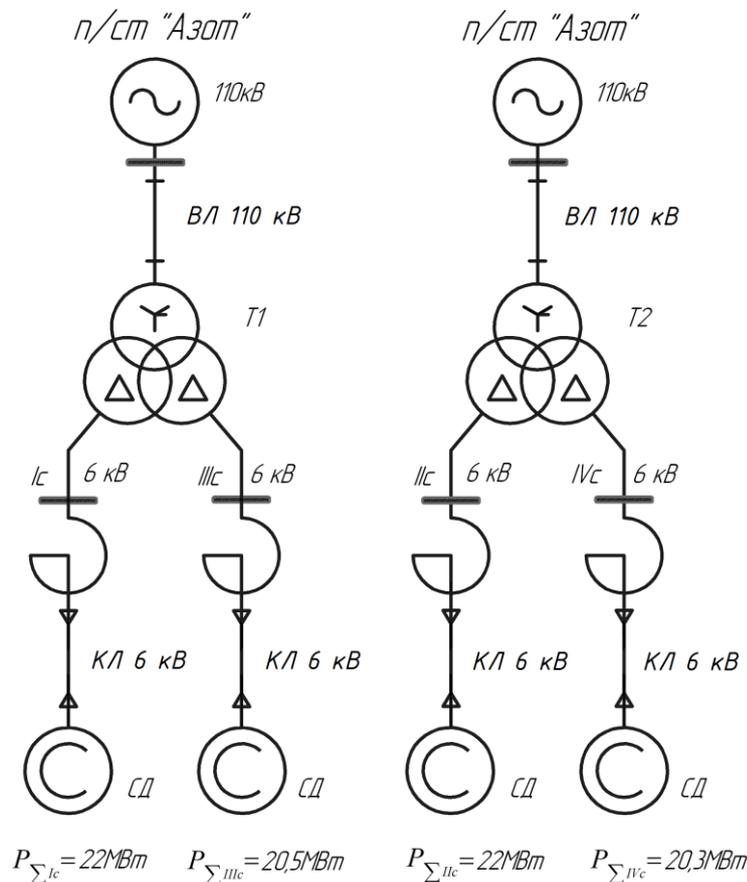


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема подстанции «Елховка»

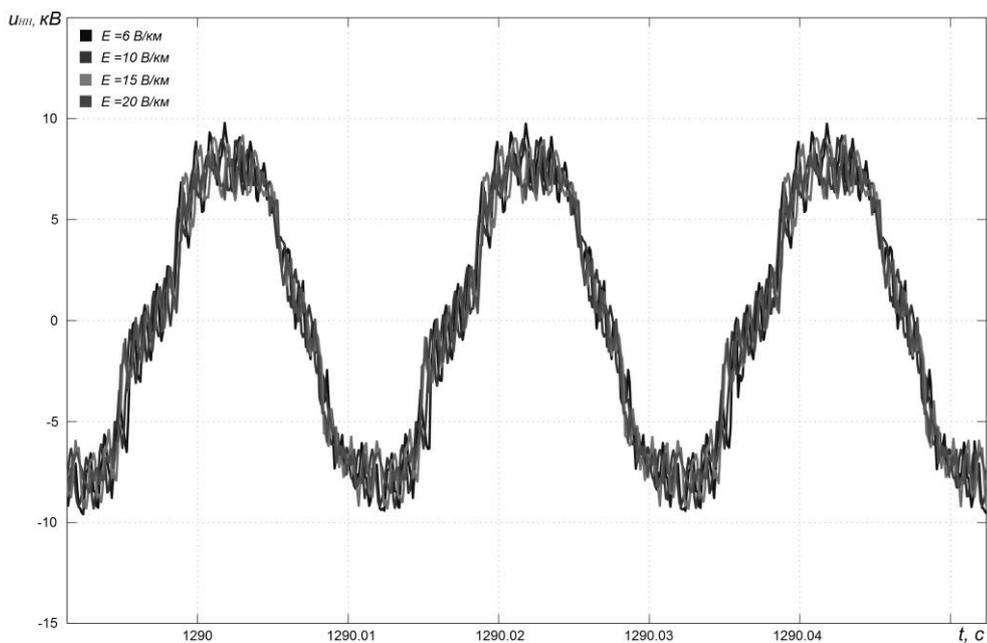


Рис. 2. Осциллограммы напряжения обмотки НН силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка»

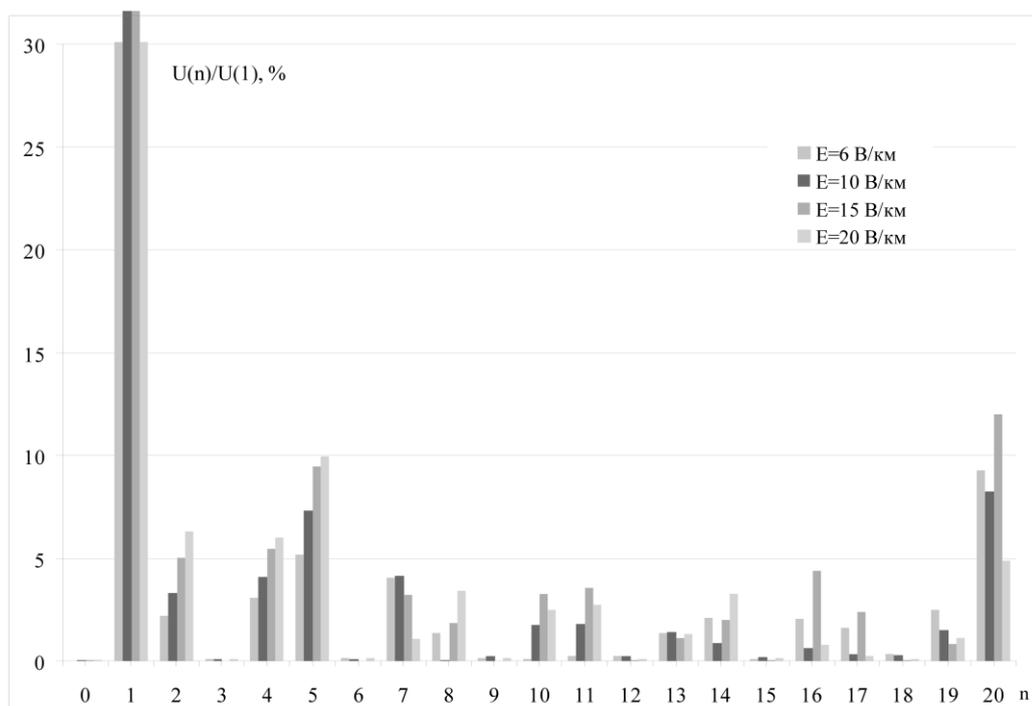


Рис. 3. Линейчатые спектры коэффициентов гармонических составляющих напряжения обмотки НН силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка»

Кривые напряжения обмотки НН силового трансформатора Т1 искажены значительно. Линейчатые спектры показывают, что отсутствуют гармонические составляющие, кратные 3, однако четные и нечетные коэффициенты от 2-й до 20-й гармонических составляющих напряжения превышают значения, нормируемые ГОСТ 32144-2013 для сетей 6–25 кВ. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения обмотки НН силового трансформатора при интенсивностях геоэлектрического поля $E_{(x,y)}=6–20 В/км$,

соответственно, составляет $K_U=16,0–22,29 \%$ и превышает предельное значение 8% , нормируемое ГОСТ 32144-2013.

Результаты компьютерного моделирования – осциллограммы тока в обмотке НН силового трансформатора Т1 ТРДН-63000/115/6,3/6,3 подстанции «Елховка» приведены на рис. 4. Линейчатые спектры коэффициентов от 2-й до 20-й гармонических составляющих тока обмотки НН при различных интенсивностях геоэлектрического поля приведены на рис. 5.

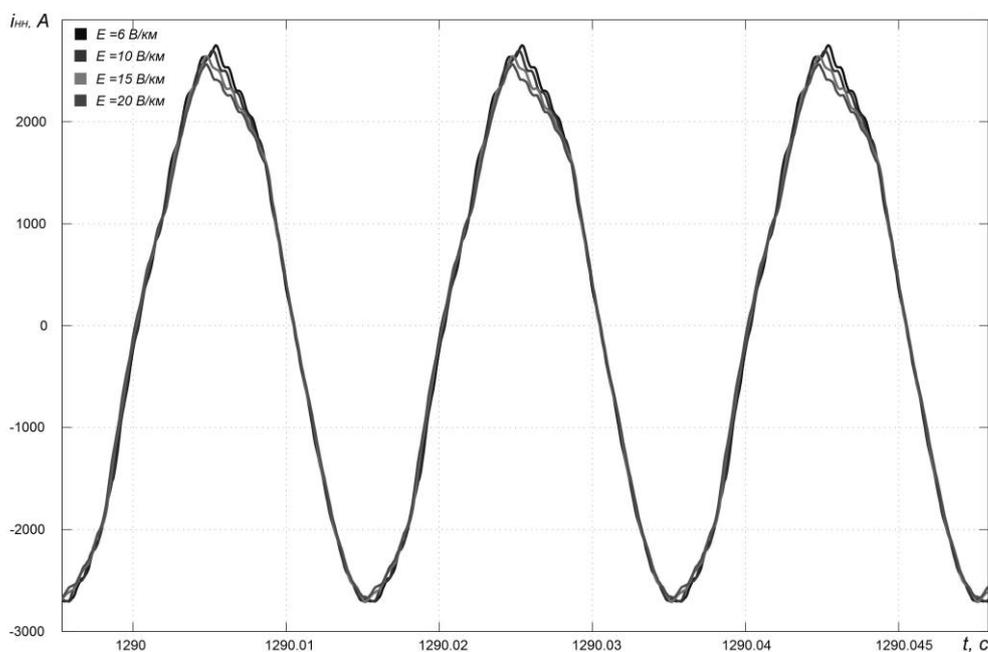


Рис. 4. Осциллограммы тока в обмотке НН силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка»

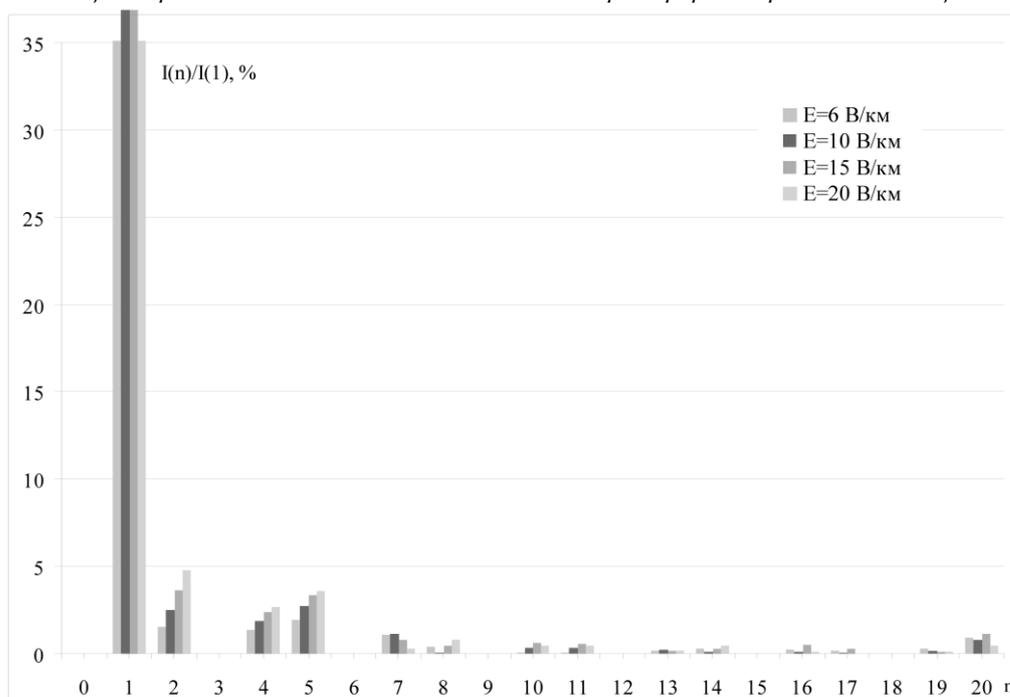


Рис. 5. Линейчатые спектры коэффициентов гармонических составляющих тока обмотки НН силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка»

Значения коэффициентов гармонических составляющих тока определялись по формуле:

$$K_{I(n)} = \frac{I(n)}{I(1)} \cdot 100,$$

где $I_{(1)}$ – ток основной гармонической составляющей;
 $I_{(n)}$ – ток n -й гармонической составляющей.

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определялось по формуле:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100.$$

Обмотки НН1–НН2 силового трансформатора соединены по схеме Δ-Δ, поэтому в кривой тока отсутствуют постоянная и кратные 3 гармонические составляющие. Кривая тока искажена незначительно, однако при $E_{(x,y)}=6$ В/км значения коэффициентов 2-й, 4-й и 5-й гармонических составляющих тока составляют 2; 2,1; 2,4 % соответственно и при $E_{(x,y)}=20$ В/км–4,9; 2,5 и 3,8 % соответственно. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в обмотке НН силового трансформатора при интенсивностях геоэлектрического поля $E_{(x,y)}=6–20$ В/км составляет $K_f=3,37–6,6$ 7%.

Таким образом, интенсивность геоэлектрического поля влияет на уровень гармонических составляющих кривых тока СТ, однако кривая тока обмотки НН искажена меньше из-за отсутствия постоянной и третьих гармонических составляющих тока.

Полученные в результате компьютерного моделирования значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I на стороне НН силовых трансформаторов Т1 подстанций «Елховка» ($l=54,4$ км) и «КуйбышевАзот» ($l=11,47$ км) при различных коэффициентах загрузки и интенсивностях геоэлектрического поля представлены в табл. 1 и 2.

Из приведенных таблиц 1 и 2 следует, что на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на стороне НН силового трансформатора:

- наиболее сильное влияние оказывают параметры СЭС. Например, при уменьшении длины ВЛ 110 кВ в 4,7 раза и, следовательно, величины ГИТ, протекающего по заземленной обмотке высокого напряжения (ВН) силового трансформатора, суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения силового трансформатора уменьшаются в 3–6 раз;

- влияет интенсивность геоэлектрического поля при неизменных параметрах СЭС. Например, при увеличении напряженности геоэлектрического поля с 6 В/км до 20 В/км суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения силового трансформатора увеличиваются в 1,4–2,9 раза;

- в меньшей степени влияет коэффициент загрузки силового трансформатора. Например, при увеличении коэффициента загрузки в 2 раза и при неизменных параметрах СЭС и геоэлектрического поля суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения силового трансформатора уменьшаются в 1,2–1,4 раза.

На суммарный коэффициент гармонических составляющих тока на стороне НН силового трансформатора:

- наиболее сильное влияние оказывают параметры СЭС. Например, при уменьшении длины ВЛ 110 кВ в 4,7 раза и, следовательно, величины ГИТ, протекающего по заземленной обмотке ВН силового трансформатора, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока силового трансформатора уменьшается в 4–6 раз;

- влияет интенсивность геоэлектрического поля. Например, с увеличением напряженности геоэлектрического поля с 6 В/км до 20 В/км суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока возрастают в 1,6–2,6 раза;

- в меньшей степени влияет коэффициент загрузки силового трансформатора. Например, при увеличении коэффициента загрузки силового трансформатора в 2 раза и при неизменных параметрах СЭС и геоэлектрического поля суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока уменьшаются в 1,12–1,23 раза.

Таблица 1. Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I на стороне НН силового трансформатора Т1 подстанции «Елховка» ($l=54,4$ км) при различных коэффициентах загрузки и интенсивностях геоэлектрического поля

$K_U, \%$ $K_I, \%$	$k_3=0,3$				$k_3=0,7$			
	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км
K_U	18,24	19,38	24,0	24,6	16,0	17,35	21,68	22,29
K_I	3,47	5,48	6,63	7,28	3,37	4,48	5,36	6,67
$K_U, \%$ $K_I, \%$	$k_3=1,0$				$k_3=1,4$			
	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км
K_U	13,9	15,05	19,28	20,54	11,12	12,48	16,96	18,29
K_I	3,04	4,10	5,39	6,20	2,74	3,87	5,18	5,91

Таблица 2. Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I на стороне НН силового трансформатора Т1 подстанции «КуйбышевАзот» ($l=11,47$ км) при различных коэффициентах загрузки и интенсивностях геоэлектрического поля

$K_U, \%$ $K_I, \%$	$k_3=0,3$				$k_3=0,7$			
	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км
K_U	2,88	3,85	5,84	7,63	2,81	3,49	5,4	7,17
K_I	0,66	1,01	1,39	1,75	0,62	0,94	1,29	1,63
$K_U, \%$ $K_I, \%$	$k_3=1,0$				$k_3=1,4$			
	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км	E=6 В/км	E=10 В/км	E=15 В/км	E=20 В/км
K_U	2,46	3,28	5,06	6,84	2,13	3,13	4,9	6,22
K_I	0,57	0,87	1,20	1,52	0,55	0,84	1,17	1,46

ВЫВОДЫ

На примере двух вариантов электроснабжения подстанций – от «длинной» питающей линии ВЛ 110 кВ длиной $l=54,4$ км («Елховка») и от «короткой» питающей линии ВЛ 110 кВ длиной $l=11,47$ км («Куйбышев-Вазот») – показано влияние параметров геоэлектрического поля и системы электроснабжения на несинусоидальность тока и напряжения в точке передачи электрической энергии.

Получено, что при геомагнитных бурях для подстанции с «длинной» ВЛ 110 кВ четные и нечетные коэффициенты в рассматриваемом диапазоне от 2-й до 20-й гармонических составляющих напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения обмотки НН силового трансформатора могут превысить значения, нормируемые ГОСТ 32144-2013 для сетей 6–25 кВ. При этом кривая тока обмотки НН искажена незначительно, однако значения коэффициентов 2-й, 4-й и 5-й гармонических составляющих тока при напряженности геоэлектрического поля 20 В/км достигают значений 4,9; 2,5 и 3,8 % соответственно, что в случае питания высоковольтной электродвигательной нагрузки от шин НН силового трансформатора может привести к дополнительным потерям мощности, к появлению дополнительных составляющих электромагнитного момента, к ухудшению и даже нарушению их статической устойчивости.

Поэтому в целях обеспечения электромагнитной совместимости потребителей с системой электроснабжения по несинусоидальности напряжения в точке передачи электрической энергии с учетом требований ГОСТ 32144-2013 необходима разработка нормативных документов, устанавливающих требования к параметрам

СЭС для ослабления высших гармонических при геомагнитных бурях различной интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kappenman J. Geomagnetic Storms and Their Impact on the U.S. Power Grid. Tennessee: Oak Ridge, 2010. URL: web.ornl.gov/sci/ees/etsd/pes/pubs/ferc_Meta-R-319.pdf (дата обращения: 15.09.2014)
2. McKay A.J. Geoelectric Fields and Geomagnetically Induced Currents in the United Kingdom. UK: University of Edinburgh, 2003. P. 260.
3. Карташев И.И., Нгуен Динь Дык. Влияние характеристик намагничивания трансформатора на спектр генерируемых им высших гармоник // Вестник МЭИ. 2007. № 1. С. 56–63.
4. Pulkkinen A., Viljan A. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system : Reports 2. Helsinki : Finnish Meteorological Institute, 2000. 99 p.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 19 с.
6. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Издательский дом МЭИ, 1997. 424 с.
7. Barnes P.R., Rzy D.T., McConnell B.W. Electric utility experience with geomagnetic disturbances. Tennessee: Oak Ridge, 1991. – 98 p. URL: web.ornl.gov/~webworks/cpr/v823/rpt/51089.pdf. (дата обращения: 15.09.2014)

THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF GEOELECTRIC FIELD AND ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM ON THE CURRENT AND VOLTAGE UNSINUSOIDALITY AT SUPPLY TERMINAL

© 2014

V.V. Vahnina, Doctor of Engineering, Professor,
Head of the Department «Power supply and Electrical Engineering»
A.N. Chernenko, candidate of technical sciences,
Assistant Professor of the Department «Power supply and Electrical Engineering»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: electric power system; power transformer; geinduced currents; higher harmonic components of current and voltage.

Annotation: The article describes cause-and-effect relation between geinduced currents generation and current curves distortion and the voltage in electric power system. It was demonstrated that magnetizing circuit of power transformer is the source of higher harmonics of current and voltage on exposure of geinduced currents to electric power system during geomagnetic storms. We give the results of computer modeling in the form of the current and voltage oscillographs, and line spectra of coefficients of the current and voltage harmonic components at the supply terminal, for two simulation models of electric power substations with «long» and «short» overhead power line of 110 kV when applying various power transformer load factors and geoelectric-field strength of 6–20 V/km. High-voltage synchronous electric motors are powered from the substations low-voltage buses of 6 kV.

It is demonstrated that the current and voltage unsinusoidality at the supply terminal are influenced greatly by electric power system parameters: for instance, the overhead lines length extension cause the amplification of higher harmonics of current and voltage. Geoelectric-field strength and varying of power transformer load factor affect the current and voltage unsinusoidality to a lesser degree. It is found that total voltage harmonics of low-voltage winding of a power transformer may exceed the values established by the standard GOST 32144-2013 for 6–25 kV supplies.