

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### Особенности питания синхронной нагрузки при воздействии геоиндуцированных токов на понизительную подстанцию

Вахнина В. В., канд. техн. наук, Кувшинов А. А., доктор техн. наук, Макеев М. С., инж.

Тольяттинский государственный университет

Исследовано влияние геоиндуцированных токов на высоковольтные синхронные двигатели (СД), подключенные на стороне низкого напряжения (НН) понизительной подстанции промышленного предприятия. Определены условия, при которых высшие гармоники намагничивающего тока силового трансформатора практически полностью протекают по статорным обмоткам СД. Выполнены оценки асинхронного момента и дополнительных потерь мощности, обусловленных высшими гармониками намагничивающего тока.

**Ключевые слова:** геоиндуцированный ток, понизительная подстанция, силовой трансформатор, синхронный двигатель, высшие гармоники.

В период геомагнитных бурь (ГМБ) в проводах линий электропередачи и обмотках высокого напряжения с глухозаземленной нейтралью силовых трансформаторов понизительных подстанций протекают геоиндуцированные токи (ГИТ) [1]. При этом происходит несимметричное насыщение магнитной системы силовых трансформаторов, вызывающее многократное увеличение намагничивающего тока и как следствие — потребляемой реактивной мощности. Нарушается синусоидальность напряжения вторичных обмоток и возрастают потери напряжения в силовом трансформаторе [2]. В результате во время ГМБ снижается напряжение в питаемой распределительной сети, а силовой трансформатор становится источником высших гармоник напряжения. Указанным воздействиям подвергаются все электроприемники распределительной сети, однако наиболее чувствительна к ухудшению качества питающего напряжения электродвигательная нагрузка, особенно высоковольтные СД с прямым включением в распределительную сеть 6(10) кВ.

При несинусоидальности линейных напряжений во временных зависимостях токов статорных обмоток СД присутствуют высшие гармонические составляющие, что обуславливает появление дополнительных потерь мощности, дополнительных составляющих электромагнитного момента, ухудшение и даже нарушение статической устойчивости. Наибо-

лее опасны для СД дополнительные потери мощности, вызывающие увеличение температуры изоляции, особенно в пазовой части статорных обмоток в период ГМБ. Это приводит к постепенному накоплению дефектов и ускоренному износу пазовой изоляции, пробой которой служит причиной до 80 % отказов изоляции статора высоковольтных СД. Тем не менее вопросы влияния ГИТ на условия работы последних в литературе практически не получили отражения. Поэтому актуальной и практически значимой является оценка уровня высших гармоник тока в статорных обмотках СД в период ГМБ.

**Схема замещения понизительной трансформаторной подстанции.** Поставленная задача решается на примере типовой подстанции (ПС), в качестве которой выбрана главная понизительная подстанция (ГПП) промышленного предприятия ОАО «Куйбышевазот». Упрощенная принципиальная электрическая схема ГПП, основными потребителями которой являются СД воздушных турбокомпрессоров, подключенные по кабельным линиям КЛ-6 к секциям Iс – IVс шин распределительного устройства РУ 6 кВ, представлена на рис. 1. Здесь показаны только те элементы системы электроснабжения, которые необходимо учитывать при составлении расчетной схемы замещения для исследования условий работы СД при подмагничивании силовых трансформаторов Т1, Т2 геоиндуци-

рованным током, протекающим в фазных проводах линий электропередачи ВЛ-110 и КЛ-110 в период ГМБ. Полная схема замещения ГПП, в которой контур намагничивания силового трансформатора Т1 (Т2) учитывается введением источника гармоник  $\sum_{n=0}^{\infty} I_{\mu(n)}$

намагничивающего тока, приведена на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $x_{1(n)}$  и  $r_{1(n)}$  — индуктивное и активное сопротивление фазного провода воздушной линии ВЛ-110 на частоте  $n$ -й гармоники;  $b_{c1(n)}$  — суммарная емкостная проводимость на “землю” фазного провода воздушной и кабельной линий ВЛ-110 и КЛ-110 на частоте  $n$ -й гармоники;  $x_{2(n)}$  и  $r_{2(n)}$  — индуктивное и активное сопротивление фазного провода кабельной линии КЛ-110 и фазной обмотки ВН силового трансформатора Т1 (Т2) на частоте  $n$ -й гармоники;  $x_{3(n)}$  и  $r_{3(n)}$  — индуктивное и активное сопротивление на частоте  $n$ -й гармоники фазной обмотки НН2 силового трансформатора Т1 (Т2) и кабельной линии КЛ-6, питающей СД от секции шин Ic (IIIc);  $b_{c2(n)}$  — емкостная проводимость на частоте  $n$ -й гармоники кабельной линии КЛ-6, питающей СД от секции шин Ic (IIIc);  $x_{4(n)}$  и  $r_{4(n)}$  — индуктивное и активное сопротивление на частоте  $n$ -й гармоники фазной обмотки НН1 силового трансформатора Т1 (Т2) и кабельной линии КЛ-6, питающей СД от секции шин IIc (IVc);  $b_{c3(n)}$  — емкостная проводимость на частоте  $n$ -й гармоники кабельной линии КЛ-6, питающей СД от секции шин IIc (IVc);  $I_{\mu(n)}$  —  $n$ -я гармоника намагничивающего тока силового трансформатора Т1 (Т2).

Параметры гармоник тока намагничивания  $I_{\mu(n)}$  для схемы замещения на рис. 2 определены по результатам компьютерного моделирования силового трансформатора Т1 (Т2) типа ТРДН-63000/115/6,3/6,3 в условиях протекания по обмоткам ВН геоиндуциро-

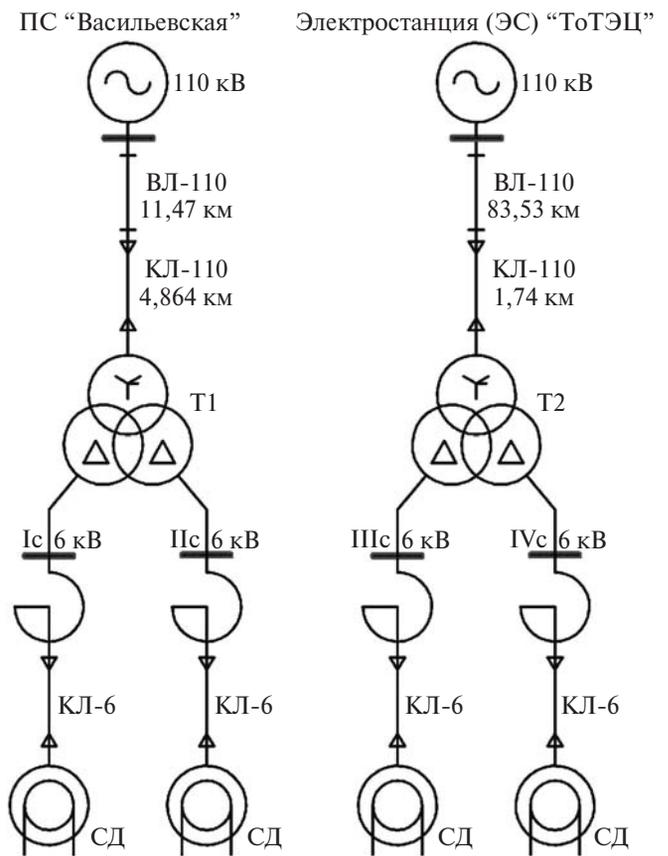


Рис. 1

ванных токов 82,64 А, что соответствует индексам возмущенности геомагнитного поля К-8 и К-9. Результаты расчета параметров гармоник намагничивающего тока, приведенных к стороне НН, представлены в табл. 1. Как видно, намагничивающий ток силового трансформатора Т1 (Т2) в условиях воздействия ГИТ содержит полный спектр гармоник, из которых наиболее значимыми являются гармоники порядков до  $n = 8$  включительно. Следует отметить наличие четных гармоник намагничивающего тока  $I_{\mu(2)} = 1576$  А и  $I_{\mu(4)} = 924$  А, значения которых вполне соизмеримы со значением основной гармоники на-

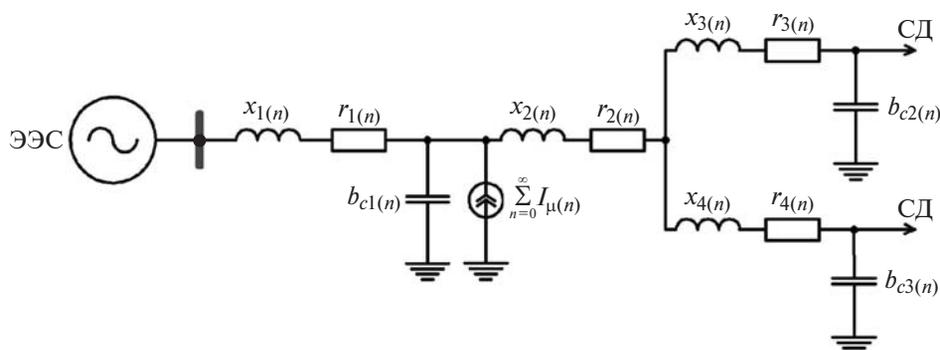


Рис. 2

Таблица 1

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$I_{\mu(n)}$ , А	1586	1576	105	924	534	188	40	136	41	
$\varphi_{\mu(n)}$ , град.	19	82	252	84	72	83	51	61	65	
<i>n</i>	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$I_{\mu(n)}$ , А	89	46	16	44	47	12,7	10,8	5,2	1,5	
$\varphi_{\mu(n)}$ , град.	74	55	262	58	43	239	63	41	160	
<i>n</i>	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$I_{\mu(n)}$ , А	7,7	9,2	1,9	4,1	24,3	21,4	80,8	93,1	24,8	84,5
$\varphi_{\mu(n)}$ , град.	51	302	188	308	34	209	12	15	2,1	8,1

Таблица 2

Элемент схемы замещения	$x_1$ , Ом	$r_1$ , Ом	$C_1$ , мкФ	$x_2$ , Ом	$r_2$ , Ом	$x_3$ , Ом
ПС “Васильевская”	0,0152	0,0144	533	0,011	0,003	0,246
ЭС “ТоТЭЦ”	0,00116	0,00074	180	0,0083	0,00123	0,246

Элемент схемы замещения	$r_3$ , Ом	$C_2$ , мкФ	$x_4$ , Ом	$r_4$ , Ом	$C_3$ , мкФ	$P_1$ , МВт	$P_2$ , МВт
ПС “Васильевская”	0,041	0,76	0,18	0,021	1,52	22	20,8
ЭС “ТоТЭЦ”	0,041	0,76	0,202	0,0275	1,14	22	19,8

магнитизирующего тока ( $I_{\mu(1)} = 1586$  А). Эффективное значение намагничивающего тока

$$I_{\mu \text{ эф}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N=28} I_{\mu(n)}^2} = 3033 \text{ А,}$$

т. е. многократно превышает номинальное значение тока холостого хода (0,5 %) силового трансформатора при отсутствии ГИТ, а эффективное значение только четных гармоник намагничивающего тока

$$I_{\mu \text{ эф}} = \sqrt{\sum_{\substack{n=2k \\ k \geq 1}} I_{\mu(n)}^2} = 2004 \text{ А.}$$

Это служит подтверждением того, что характер перемангнитивания магнитной системы силового трансформатора Т1 (Т2) близок к режиму однополупериодного выпрямления намагничивающего тока.

Параметры схемы замещения на частоте основной гармоники (50 Гц), приведенные к стороне НН, представлены в табл. 2 (здесь и далее для параметров без индекса “*n*” указаны значения на частоте основной гармоники).

**Схема замещения СД для высших гармоник.** Ввиду магнитной и электрической несимметрии ротора, обусловленной обмоткой возбуждения, схемы замещения СД по продольной (рис. 3, а) и поперечной (рис. 3, б) осям различаются [3]. На схеме замещения реальная трехфазная статорная обмотка представлена системой двух ортогональных вращающихся контуров — продольного и поперечного, а ротор — контуром обмотки возбуждения, продольным и поперечным демпферными контурами.

При насыщении силового трансформатора Т1 (Т2) под воздействием ГИТ в статорных обмотках СД кроме основной составляющей

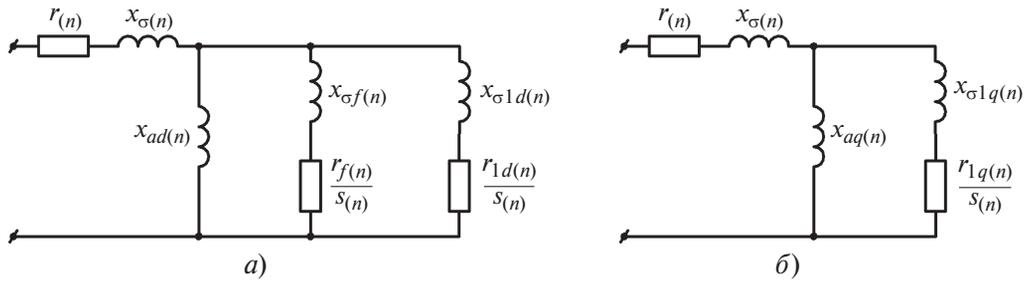


Рис. 3

тока частотой 50 Гц начинают протекать токи высших гармоник. Если не учитывать насыщение, то СД можно рассматривать как линейную систему, для которой применим принцип суперпозиции. В этом случае анализ проводится независимо для основной составляющей и каждой высшей гармоники. В частности, потребляемый ток и момент СД равны сумме составляющих токов и моментов от каждой гармоники. Параметры схемы замещения СД:

$r_{(n)}$  и  $x_{\sigma(n)}$  — активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки на частоте  $n$ -й гармоники;

$x_{ad(n)}$  и  $x_{aq(n)}$  — сопротивления взаимной индукции между статорной и роторной обмотками по продольной и поперечной осям на частоте  $n$ -й гармоники;

$r_{f(n)}$ ,  $x_{\sigma f(n)}$  — активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки возбуждения на частоте  $n$ -й гармоники;

$x_{\sigma 1d(n)}$  и  $x_{\sigma 1q(n)}$  — индуктивные сопротивления рассеяния продольного и поперечного демпферных контуров на частоте  $n$ -й гармоники;

$r_{1d(n)}$  и  $r_{1q(n)}$  — активные сопротивления рассеяния продольного и поперечного демпферных контуров на частоте  $n$ -й гармоники.

Определить параметры схемы замещения можно по методике, изложенной в [3], но дополнительно необходимо учитывать:

увеличение всех индуктивных сопротивлений в  $n$  раз по сравнению со значениями на частоте основной гармоники;

скольжение  $s_{(n)}$   $n$ -й гармоники магнитодвижущей силы прямой или обратной последовательности, создаваемой  $n$ -й гармоникой фазных токов статорной обмотки, значение которого определяется (при сохранении синхронного движения ротора) из выражения

$$s_{(n)} = \frac{(n \mp 1) \pm s}{n}, \quad (1)$$

где  $s$  — скольжение ротора относительно вращающегося магнитного поля основной гармоники (при синхронном движении ротора

$s = 0$ ); “+” и “-” соответствуют гармоникам тока статорной обмотки прямой и обратной последовательностей;

увеличение активных сопротивлений статора и ротора вследствие поверхностного эффекта на повышенных частотах. Зависимость активных сопротивлений контуров СД от частоты аппроксимируется эмпирическим выражением [4]

$$r_{(n)} = r_{(1)} \sqrt{n},$$

где  $r_{(1)}$  — сопротивление контура на частоте основной гармоники.

**Комплексное сопротивление СД на частоте  $n$ -й гармоники.** Для оценки степени воздействия отдельных гармоник целесообразно определить среднее эквивалентное комплексное сопротивление СД по двум осям [5], которое на частоте  $n$ -й гармоники согласно схеме замещения на рис. 3 вычисляют из выражения

$$\dot{Z}_{d-q(n)} = r_{(n)} + jn x_{\sigma} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\dot{Y}_{ad(n)} + \dot{Y}_{f(n)} + \dot{Y}_{1d(n)}} + \frac{1}{\dot{Y}_{aq(n)} + \dot{Y}_{1q(n)}} \right), \quad (2)$$

где  $\dot{Y}_{ad(n)}$  и  $\dot{Y}_{aq(n)}$  — комплексные проводимости взаимной индукции между обмоткой статора и контурами ротора по продольной и поперечной осям на частоте  $n$ -й гармоники;  $\dot{Y}_{f(n)}$  — комплексная проводимость обмотки возбуждения на частоте  $n$ -й гармоники;  $\dot{Y}_{1d(n)}$  и  $\dot{Y}_{1q(n)}$  — комплексные проводимости продольного и поперечного демпферных контуров соответственно на частоте  $n$ -й гармоники.

Выражение (2) можно записать в компактном и удобном для дальнейшего анализа виде:

$$\dot{Z}_{d-q(n)} = r_{d-q(n)} + jx_{d-q(n)}, \quad (3)$$

где  $r_{d-q(n)} = r_{(n)} + 0,5(r_{\Sigma d(n)} + r_{\Sigma q(n)})$  и  $x_{d-q(n)} = nx_{\sigma} + 0,5(x_{\Sigma d(n)} + x_{\Sigma q(n)})$  — средние эквивалентные активное и реактивное сопротивления

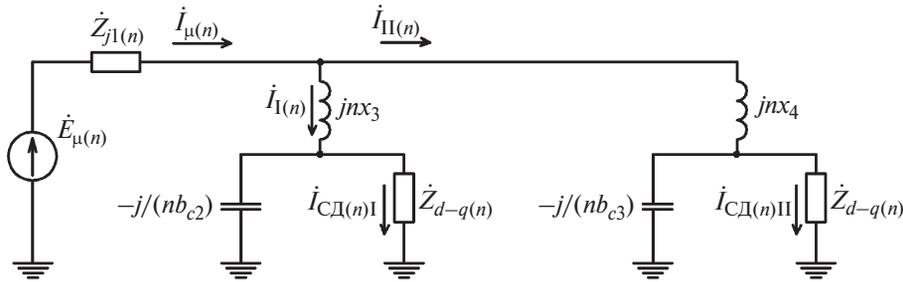


Рис. 4

ния СД по двум осям;  $r_{\Sigma d(n)}$  и  $r_{\Sigma q(n)}$  — суммарные активные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения СД на частоте  $n$ -й гармоники по продольной и поперечной осям соответственно;  $x_{\Sigma d(n)}$  и  $x_{\Sigma q(n)}$  — суммарные реактивные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения СД по продольной и поперечной осям соответственно.

На основе формулы (3) схему замещения СД для высших гармоник, показанную на рис. 3, можно свести к комплексному сопротивлению  $\dot{Z}_{d-q(n)}$ .

**Высшие гармоники тока в статорных обмотках СД.** Для определения токов высших гармоник, протекающих в статорных обмотках СД при подмагничивании силового трансформатора ГИТ, необходимо дополнить схему замещения ГПП на рис. 2 схемой замещения СД комплексным сопротивлением  $\dot{Z}_{d-q(n)}$ .

Предварительно источник тока  $\dot{I}_{\mu(n)}$  целесообразно преобразовать в эквивалентный источник ЭДС  $\dot{E}_{\mu(n)}$ , внутреннее комплексное сопротивление которого определяется по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{J(n)} &= r_{J(n)} + jx_{J(n)} = Z_{J(n)} e^{j\varphi_{J(n)}}; \\ r_{J(n)} &= \frac{r_{l(n)}}{(1 - n^2 x_{l1} b_{cl})^2 + (nb_{cl} r_{l(n)})^2}; \\ x_{J(n)} &= nx_1 \frac{1 - n^2 x_{l1} b_{cl} - (b_{cl} r_{l(n)} / x_1)}{(1 - n^2 x_{l1} b_{cl})^2 + (nb_{cl} r_{l(n)})^2}; \\ Z_{J(n)} &= \sqrt{r_{J(n)}^2 + x_{J(n)}^2}; \quad \text{tg}\varphi_{z(n)} = \frac{x_{J(n)}}{r_{J(n)}}. \end{aligned} \right\} (4)$$

В результате объединения указанных выше схем получена расчетная схема замещения для определения тока  $n$ -й гармоники в обмотке статора СД (см. рис. 4), позволяющая анализировать токораспределение высших гармоник, генерируемых контуром намагни-

чивания трансформатора, а также возможные резонансные явления (в этой схеме не учитываются активные сопротивления обмоток силового трансформатора).

Из условия  $(1 - n^2 x_{l1} b_{cl})^2 + (nb_{cl} r_{l(n)})^2 = 0$  определяется резонансная частота  $\omega_p$  внутреннего комплексного сопротивления

$$\omega_p = n\omega_{(1)} = \sqrt{\frac{1 - (r_{l(n)} / \rho_{l1})^2}{L_1 C_1}},$$

где  $\omega_{(1)}$  — угловая частота основной гармоники;  $\rho_{l1} = \sqrt{L_1 / C_1}$  — волновое сопротивление комбинированной кабельно-воздушной линии.

Следует отметить, что для условий ПС “Васильевская” резонансной является гармоника  $n = 20$ , которой соответствует максимальное значение эквивалентной ЭДС  $E_{\mu(20)} = 86,14$  В. Для условий ЭС “ТоТЭЦ” резонансной является гармоника  $n = 123$ . Кроме того, по результатам количественных оценок можно отметить, что значение эквивалентной ЭДС в условиях ЭС “ТоТЭЦ” значительно (более чем на порядок) меньше, чем в условиях ПС “Васильевская”. Это объясняется тем, что силовой трансформатор Т2 подключен практически к шинам 110 кВ ЭС “ТоТЭЦ”, т. е. к шинам бесконечной мощности.

Используя схему замещения на рис. 4, ток  $n$ -й гармоники, протекающий в обмотке статора СД, можно записать в виде

$$\dot{I}_{\text{СД}(n)} = \dot{K}_{\text{В-Н}} \dot{K}_{\text{Н1-Н2}} \dot{K}_{\text{д}} \dot{I}_{\mu(n)}, \quad (5)$$

где  $\dot{K}_{\text{В-Н}}$ ,  $\dot{K}_{\text{Н1-Н2}}$ ,  $\dot{K}_{\text{д}}$  — комплексные коэффициенты деления  $n$ -й гармоники намагничивающего тока силового трансформатора Т1 между сторонами ВН и НН, расщепленными обмотками НН, обмоткой СД и поперечной емкостной проводимостью питающего кабеля.

Выражение (5) наглядно показывает, какая часть  $n$ -й гармоники намагничивающего тока трансформатора Т1 протекает по обмот-

ке статора СД и как она зависит от параметров системы электроснабжения. Значения комплексных коэффициентов деления определяются из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{K}_{В-Н} &= \frac{\dot{Z}_{J(n)}(\dot{Z}_{I(n)} + \dot{Z}_{II(n)})}{\dot{Z}_{I(n)} + \dot{Z}_{II(n)} + \dot{Z}_{J(n)}(\dot{Z}_{I(n)} + \dot{Z}_{II(n)})}; \\ \dot{K}_{Н1-Н2} &= \frac{\dot{Z}_{II(n)}}{\dot{Z}_{I(n)} + \dot{Z}_{II(n)}}; \\ \dot{K}_{Н2-Н1} &= 1 - \dot{K}_{Н1-Н2}; \\ \dot{K}_{д(I)} &= \frac{1}{1 + jnb_{c2}\dot{Z}_{dq(n)I}}; \\ \dot{K}_{д(II)} &= \frac{1}{1 + jnb_{c3}\dot{Z}_{dq(n)II}} \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $\dot{Z}_{I(n)} = r_{I(n)} + jx_{I(n)}$  и  $\dot{Z}_{II(n)} = r_{II(n)} + jx_{II(n)}$  — комплексные сопротивления СД на частоте  $n$ -й гармоники с учетом параметров питающего кабеля и токоограничивающего реактора;

$$\begin{aligned} r_{I(n)} &= \frac{r_{d-q(n)I}}{(1 - nb_{c2}x_{d-q(n)I})^2 + (nb_{c2}r_{d-q(n)I})^2}; \\ x_{I(n)} &= nx_3 + \frac{\left(1 - nb_{c2}x_{d-q(n)I} - nb_{c2}\frac{r_{d-q(n)I}^2}{x_{d-q(n)I}}\right)^2}{(1 - nb_{c2}x_{d-q(n)I})^2 + (nb_{c2}r_{d-q(n)I})^2}; \\ r_{II(n)} &= \frac{r_{d-q(n)II}}{(1 - nb_{c3}x_{d-q(n)II})^2 + (nb_{c3}r_{d-q(n)II})^2}; \\ x_{II(n)} &= nx_4 + \frac{\left(1 - nb_{c3}x_{d-q(n)II} - nb_{c3}\frac{r_{d-q(n)II}^2}{x_{d-q(n)II}}\right)^2}{(1 - nb_{c3}x_{d-q(n)II})^2 + (nb_{c3}r_{d-q(n)II})^2}. \end{aligned}$$

По выражениям (5) и (6) можно определить токи высших гармоник в статорных обмотках СД, подключенных к секциям шин Ic ( $I_{СД(n)I}$ ) и Ic ( $I_{СД(n)II}$ ), при воздействии ГИТ на силовой трансформатор Т1 со стороны линии электропередачи. Количественные оценки свидетельствуют, что уровень большинства высших гармоник в статорных обмотках СД не превышает (3 – 7) % от уровня одноименных гармоник намагничивающего

тока силового трансформатора Т1. Только для 19, 20 и 22-й гармоник относительный уровень значительно выше — 19, 48 и 13,2 % соответственно. Однако в именованных единицах указанные гармоники не превышают уровня 2-й гармоники тока в статорных обмотках СД. Анализ этих выражений позволяет определить условия, при которых коэффициенты деления  $K_{В-Н}$  и  $K_{Н1-Н2}$  могут принимать максимальные значения  $K_{В-Н} = 1$ ,  $K_{Н1-Н2} = 1$ , а коэффициенты деления  $K_{д(I)}$ ,  $K_{д(II)}$  многократно превысят единичное значение, т. е.  $K_{д(I)} \gg 1$ ,  $K_{д(II)} \gg 1$ . Можно выделить три таких условия:

1. Питание силового трансформатора Т1 осуществляется только от воздушной линии ВЛ-110. В этом случае емкостная проводимость  $b_{c1} \approx 0$ . При отсутствии ее шунтирующего действия высшие гармоники намагничивающего тока трансформатора Т1 будут “стекать” на сторону НН, а коэффициент деления соответственно принимать максимальное значение  $K_{В-Н} \approx 1,0$ , если соотношение доминирующих сопротивлений схемы замещения на рис. 4 удовлетворяет условию  $\dot{Z}_{J(n)} \geq 5\dot{Z}_{d-q(n)}$ .

2. Питание СД осуществляется только от одной секции шин — Ic или IIIc. Такая ситуация вполне возможна при проведении ремонтных работ в случае возникновения аварии. Тогда коэффициенты деления  $K_{Н1-Н2} = 1$ ,  $K_{Н2-Н1} = 0$  или  $K_{Н1-Н2} = 0$ ,  $K_{Н2-Н1} = 1$ .

3. Длина кабельной линии КЛ-6 достаточно велика для возникновения резонансных явлений между поперечной емкостной проводимостью  $b_{c2}$  ( $b_{c3}$ ) и индуктивной составляющей  $x_{d-q(n)}$  эквивалентного комплексного сопротивления СД в области частот гармоник  $n = 2 \div 28$  намагничивающего тока трансформатора Т1.

Порядок резонансной гармоники с учетом расчетной схемы замещения на рис. 4 можно оценить, используя выражение

$$n = \sqrt{\frac{x_{d-q(1)} - r_{d-q(1)}b_{c0}l}{x_{d-q(1)}^2 b_{c0}l}}, \quad (7)$$

где  $b_{c0}$  и  $l$  — погонная емкостная проводимость и длина кабельной линии;  $x_{d-q(1)}$  и  $r_{d-q(1)}$  — индуктивная и активная составляющие эквивалентного комплексного сопротивления СД на частоте основной гармоники ( $n = 1$ ).

По выражению (7) можно определить критическую длину кабельной линии КЛ-6,

при которой наступают резонансные явления непосредственно в статорных обмотках СД:

$$I_{\text{кр}} = \frac{x_{d-q(1)}}{b_{c0}(r_{d-q(1)}^2 + n^2 x_{d-q(1)}^2)} \approx \frac{1}{n^2 b_{c0} x_{d-q(1)}}. \quad (8)$$

Для кабельных линий КЛ-6 погонная емкостная проводимость в зависимости от сечения жилы  $b_{c0} = (289 \div 361,3) \cdot 10^{-6}$  См/км. Тогда для гармоник намагничивающего тока  $n \geq 2$  критическая длина кабельной линии КЛ-6  $l_{\text{кр}} = 4,1$  км. При  $l < 4,1$  км резонансные явления не наступают, а в случае  $l > l_{\text{крmin}} = 4,1$  км возможны резонансные явления на частотах нескольких гармоник намагничивающего тока трансформатора Т1.

На частоте резонансной гармоники существенно возрастает значение комплексных коэффициентов деления  $\dot{K}_{д(I)}$  и  $\dot{K}_{д(II)}$ . Для подтверждения этого достаточно подставить значение резонансной гармоники из выражения (8) в выражение (6). Тогда с учетом соотношений  $x_{d-q(1)} \gg r_{d-q(1)}$  и  $r_{d-q(n)} = \sqrt{n} r_{d-q(1)}$  можно получить

$$\dot{K}_{д} \approx \frac{1}{jn^{3/2} b_{c0} l_{\text{кр}}}. \quad (9)$$

Например, для  $n = 28$  значение комплексного коэффициента деления  $\dot{K}_{д} \approx -4,6j$ , т. е. за счет резонансных явлений произойдет почти пятикратное увеличение 28-й гармоники намагничивающего тока трансформатора Т1 в статорных обмотках СД.

Таким образом, наиболее тяжелые последствия для СД наступят, когда рассмотренные выше условия будут действовать одновременно. В результате высшие гармоники намагничивающего тока силового трансформатора Т1 практически полностью протекают по статорным обмоткам СД, т. е.  $I_{\text{СД}(n)} \approx I_{\mu(n)}$ . В этом случае дополнительные потери мощности в СД от высших гармоник тока при значениях, указанных в табл. 1, превысят приблизительно в 1,43 раза потери мощности в номинальном режиме.

**Асинхронные моменты СД.** Для резонансных гармоник  $n_p$  намагничивающего тока возможно  $I_{\text{СД}(n_p)} \gg I_{\mu(n_p)}$ . В связи с этим возникает необходимость учета негативных последствий резонансного увеличения в обмотках статора одной или нескольких гармоник намагничивающего тока, в частности, оценки возникающих при этом асинхронных моментов.

Постоянный асинхронный момент на валу СД, обусловленный взаимодействием одинаковых гармоник магнитного потока в зазоре и тока ротора, формируется из двух составляющих [3]:

$$M_{a(n)} = M_{ad(n)} + M_{aq(n)},$$

где  $M_{ad(n)}$  — асинхронный момент, обусловленный реакцией обмотки возбуждения и продольного демпферного контура;  $M_{aq(n)}$  — асинхронный момент, обусловленный поперечным демпферным контуром.

Для того, чтобы иметь возможность применить данную формулу, необходимо знать значения токов  $n$ -й гармоники в отдельных контурах СД, что для практических расчетов крайне неудобно. Поэтому целесообразно использовать упрощенную схему замещения СД эквивалентным комплексным сопротивлением, для которой можно записать:

$$M_{a(n)} = \frac{pm}{n\omega(1)} I_{\text{СД}(n)}^2 \frac{r_{d-q(n)}}{s(n)}, \quad (10)$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $m$  — число фаз статорной обмотки СД.

С учетом значений скольжения  $s(n)$ , полученных из выражения (1), и значений тока  $n$ -й гармоники СД, вычисленных из выражений (5) и (6), для синхронного движения ротора ( $s = 0$ ) приведем формулу (10) к виду

$$M_{a(n)} = \frac{pm}{(n \mp 1)\omega(1)} (K_{в-н} K_{C1-2} K_{д} I_{\mu(n)})^2 r_{d-q(n)}.$$

Например, для наиболее значимой 2-й гармоники намагничивающего тока трансформатора Т1 и неблагоприятного сочетания условий, когда  $K_{в-н} = 1$ ,  $K_{н1-н2} = 1$  и  $K_{д*} = 1$ , относительный асинхронный момент  $M_{a(2)} \approx 5,2\%$ . При таком значении возможно изменение механического движения ротора с последующим нарушением устойчивой работы СД в случае номинальной нагрузки на валу в условиях пониженного напряжения питания.

## Выводы

1. При воздействии ГИТ на понизительную подстанцию в период ГМБ силовой трансформатор становится источником высших гармоник намагничивающего тока, из которых наиболее интенсивными являются 2, 4 и 5-я гармоники, соизмеримых по значению с номинальным током статорных обмоток СД. Дополнительные потери мощности

от указанных гармоник могут превысить основные потери в номинальном режиме примерно на 43 %, а относительное значение асинхронного момента, обусловленного 2-й гармоникой, достигает приблизительно 5,2 %. Из остальных гармоник опасность для СД могут представлять только те, на частоте которых возникают резонансные явления на стороне ВН или НН силового трансформатора.

2. Снижение высших гармоник тока в статорных обмотках СД в период воздействия ГИТ до безопасного уровня (не более 5 – 10 % номинального тока) обеспечивается путем увеличения емкостной поперечной проводимости линии электропередачи 110 кВ, питающей понизительную подстанцию (например, за счет использования кабельной вставки), и ограничения длины кабельных линий 6 кВ (не более 500 – 1000 м), питающих СД, для исключения резонансных явлений непосредственно на статорных обмотках.

### Список литературы

1. Гершенгорн А. И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем. — Электрические станции, 1993, № 6.
2. Вахнина В. В., Черненко А. Н., Кузнецов В. А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов. — Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2012, № 3(21).
3. Гамазин С. И., Ставцев В. А., Цырук С. А. Переходные процессы в системах промышленного электропитания, обусловленные электродвигательной нагрузкой. — М.: Изд-во МЭИ, 1997.
4. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учеб. для вузов (Т. 1), 3-е изд. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

V.Vahnina@tltso.ru