

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ РАДИАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ РОТОРА

АВТОРЫ:

В.В. ВАХНИНА,
Д.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А.А. КУВШИНОВ,
Д.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А.Н. ЧЕРНЕНКО,
К.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А.Ю. ХРЕННИКОВ,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Классическая схема электрических соединений современных электростанций строится по блочному принципу. Но при этом возникает проблема синхронизации блочного трансформатора и генератора.

В определенных экстремальных условиях возникающие в блочном трансформаторе гармоники токов намагничивания могут провоцировать образование на статорных обмотках дополнительных вибрационных моментов.

Ключевые слова: синхронный генератор; блочный трансформатор; геомагнитные возмущения; геоиндуцированный ток.



В периоды геомагнитных возмущений в обмотках блочных трансформаторов могут возникать геоиндуцированные токи

ВВЕДЕНИЕ

Главная схема электрических соединений практически всех типов электростанций (тепловых, атомных, гидравлических) строится обычно по блочному принципу [1]. В обычных условиях эксплуатации режим работы магнитной системы блочного трансформатора не выходит за пределы области рабочего намагничивания электротехнической стали и практически не оказывает влияния на функционирование синхронного генератора. В периоды геомагнитных возмущений по обмоткам высокого напряжения блочного трансформатора начинают протекать квазипостоянные геоиндуцированные токи (ГИТ), вызывающие одностороннее насыщение магнитной системы и эмиссию высших гармоник тока намагничивания [2, 3]. Серьезную опасность для синхронного генератора представляют именно гармоники тока намагничивания блочного трансформатора, протекание которых по статорным обмоткам вызывает возникновение дополнительных вибрационных моментов.

Таким образом, актуальной является задача определения качественного характера механизмов опосредованного воздействия ГИТ на блочный генератор и получения

предварительных количественных оценок физических эффектов, возникающих в результате такого воздействия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УКРУПНЕННЫЙ БЛОК

Наибольшую опасность ГИТ представляют для укрупненных блоков с трехфазной группой однофазных трансформаторов, поскольку магнитные системы каждого из них становятся в случае одностороннего насыщения источником высших гармоник тока намагничивания. На рис. 1 изображена расчетная схема укрупненного блока, образованного синхронными генераторами Г1, Г2 и трехфазной группой ТГ1 однофазных трансформаторов. По воздушной линии (ВЛ) через трехфазную группу ТГ2 осуществляется выдача мощности в электроэнергетическую систему (ЭЭС), напряжение которой считается неизменным. Промежуточ-

ИНФОРМАЦИЯ

Геомагнитные бури — возмущение магнитного поля Земли длительностью от нескольких часов до нескольких суток, вызванное поступлением в окрестности Земли возмущенных высокоскоростных потоков солнечного ветра и связанной с ними ударной волны. Геомагнитные бури происходят в основном в средних и низких широтах Земли. Интенсивность геомагнитной бури описывается индексами Dst (англ. Disturbance Storm Time Index) и Kp. С ростом интенсивности бури индекс Dst уменьшается. Так, умеренные бури характеризуются Dst от –50 до –100 нТл, сильные — от –100 до –200 нТл и экстремальные — выше –200 нТл.

Мощнейшей геомагнитной бурей за всю историю наблюдений была геомагнитная буря 1859 г. За последние 25 лет XX столетия (1976—2000 гг.) было зарегистрировано 798 умеренных магнитных бурь, за 55 лет (с 1 января 1957 г. по 25 сентября 2011 г.) было зарегистрировано 5 экстремальных бурь.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА УКРУПНЕННОГО БЛОКА

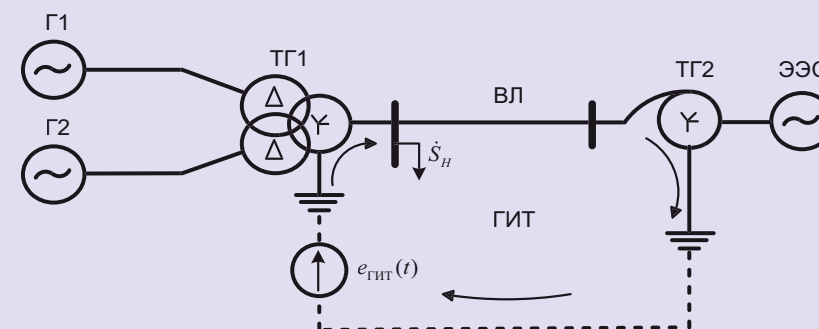


Рис. 1

ный отбор мощности S_H учитывает электроснабжение местного мощного узла потребления.

Количественные оценки, иллюстрирующие механизм воздействия ГИТ на синхронные генераторы, получены на примере численного моделирования реального укрупненного блока, в состав которого входят два синхронных генератора Г1, Г2 типа СВФ-1285/275-42У4 и группа ТГ1 однофазных трансформаторов типа ОРНЦ-533000/525/15,75 [4].

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УКРУПНЕННОГО БЛОКА

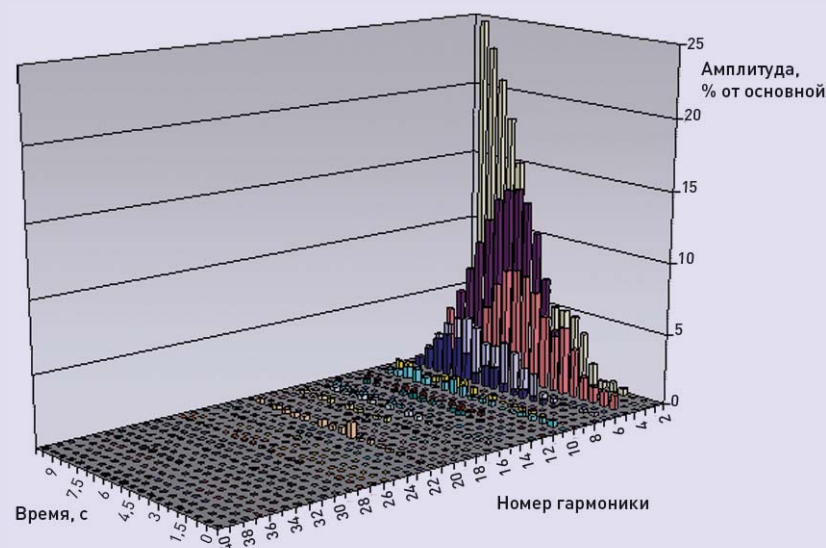


Рис. 2

Протяженность ВЛ принята равной 400 км, группа ТГ2 состоит из однофазных автотрансформаторов АОДЦТН-267000/525/230/10,5.

Моделирование проводилось в среде MATLAB с использованием программы Simulink и библиотеки стандартных блоков SimPowerSystems, причем для трансформаторов использованы модели с учетом насыщения магнитных систем. Источник линейно нарастающего геоэлектрического напряжения ($e_{гит}(t)$ на рис. 1) выбран в качестве простой и одновременно информативной модели геомагнитных возмущений, позволяющей наглядно демонстрировать эффекты от воздействия ГИТ на укрупненный блок. Параметры источника $e_{гит}(t)$, а соответственно и скорость нарастания, и величина потенциала заземляющего устройства трехфазной группы ТГ1 выбирались исходя из того, что геоэлектрические поля на поверхности Земли, возбуждаемые геомагнитны-

ми возмущениями, имеют характерные частоты менее 0,1 Гц.

Уровень интенсивности источника геоэлектрического напряжения разнонаправлено отражается на амплитуде гармоник различных порядков в составе тока статорных обмоток синхронного генератора (рис. 2). В частности, зависимости уровней 4-й и 5-й гармоник имеют ярко выраженные максимумы, соответственно примерно 12,5 и 7,5 % от амплитуды основной гармоники, которые наблюдаются на временном интервале (6±7) с.

Вторая гармоника тока статора на указанном интервале достигает только промежуточного значения, около 15 %, и продолжает увеличиваться при дальнейшем увеличении интенсивности источника геоэлектрического напряжения. Амплитуды остальных гармоник уменьшаются до значений, не превышающих несколько процентов от основной

гармоники. В результате в составе тока статора доминируют только две гармоники — основная и вторая, причем токи второй гармоники являются токами обратной последовательности. Действующее значение тока второй гармоники к моменту времени $t \approx 9,0$ с возрастает до 13,75 кА, что составляет примерно 53 % номинальной величины тока статора. Токи обратной последовательности представляют большую опасность для синхронных генераторов. Поэтому на генераторах мощностью более 30 МВт применяется токовая защита обратной последовательности с выдержкой времени (3...5) с и током срабатывания (30...70) % номинального тока статора.

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГИТ

При питании трехфазной симметричной статорной обмотки трехфазным симметричным несинусоидальным током формируются волны магнитодвижущей силы (МДС), вид которых в общем случае определяется выражением [5]:

$$F_{(v,n)} = \frac{1}{2} \cdot F_{(v,n)m} \cdot e^{\mp jn\omega_0 t} \cdot \left[1 + e^{-j\frac{2}{3}\pi(v \mp n)} + e^{j\frac{2}{3}\pi(v \mp n)} \right] \quad (1)$$

где $v = 1, 5, 7, 9, 11, \dots$ — порядковый номер пространственной гармоники МДС; $n = 1, 2, 4, 5, \dots$ — порядковый номер временной гармоники тока статорной обмотки (см. рис. 2).

В выражении (1) знак «-» соответствует прямым волнам МДС,

которые передвигаются в воздушном зазоре в направлении 1-й гармонической составляющей и движения ротора. Прямые волны возникают в результате взаимодействия v -й пространственной и n -й временной гармоник при соотношениях порядковых номеров $|v - n| = 0, 6, 12, \dots, 6k$ и $(v + n) = 2, 8, 14, \dots, (2 + 6k) \dots$, (где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$). Знак «+» соответствует обратным волнам, которые передвигаются в воздушном зазоре в направлении, обратном направлению движения 1-й гармонической составляющей МДС и ротора. Обратные волны возникают в результате взаимодействия v -й пространственной и n -й временной гармоник при соотношениях порядковых номеров $|v - n| = 4, 10, 16, \dots, (4 + 6k) \dots$ и $(v + n) = 6, 12, 18, \dots, (6 + 6k) \dots$

Статорные обмотки синхронных генераторов проектируют таким образом, что пространственными гармониками МДС с порядковыми номерами $v > 1$ можно пренебречь. Из временных гармоник статорного тока наиболее значимой является вторая гармоника. В этой связи наибольший интерес представляет взаимодействие прямой волны 1-й гармонической и обратной волны 2-й гармонической составляющих МДС.

Прямая волна 1-й гармонической составляющей МДС определяется выражением (1) при $v = 1, n = 1$:

$$F_{(1,1)} = \frac{3}{2} \cdot F_{(1,1)m} \cdot e^{-j\omega_0 t} \quad (2)$$

обратная волна 2-й гармонической составляющей МДС определяется выражением (1) при $v = 1, n = 2$:

$$F_{(1,2)} = \frac{3}{2} \cdot F_{(1,2)m} \cdot e^{j2\omega_0 t}, \quad (3)$$

а волна результирующей МДС:

$$F_p = \frac{3}{2} \cdot e^{-j\omega_0 t} \cdot (F_{(1,1)m} + F_{(1,2)m} \cdot e^{j3\omega_0 t}) = \frac{3}{2} \cdot F_{p,m}(t) \cdot e^{j\omega_0 t}, \quad (4)$$

в воздушном зазоре движется в направлении прямой волны 1-й гармонической, но амплитуда результирующей волны:

$$F_{p,m} = (F_{(1,1)m} + F_{(1,2)m} \cdot e^{j3\omega_0 t}) \quad (5)$$

изменяется и за один оборот в воздушном зазоре три раза проходит через максимум, равный

$$F_{\max}^{(+)} = (F_{(1,1)m} + F_{(1,2)m}), \text{ и три раза — через минимум, равный}$$

$$F_{\min}^{(-)} = (F_{(1,1)m} - F_{(1,2)m})$$

В общем случае амплитуда v -й пространственной n -й временной гармоник статорного тока определяется выражением [5]:

$$F_{(v,n)m} = 1,35 \cdot k_{w(v)} \cdot \frac{I_{(n)} \cdot w}{v \cdot p}, \quad (6)$$

где $k_{w(v)}$ — обмоточный коэффициент для пространственной гармоники с порядковым номером v ; w — число витков фазной обмотки статора; p — число пар полюсов.

С помощью выражения (6) можно определить амплитуды 1-й и 2-й временных гармоник МДС при $v = 1$:

$$F_{(1,1)m} = 1,35 \cdot k_w \cdot \frac{I_{(1)} \cdot w}{p};$$

$$F_{(1,2)m} = 1,35 \cdot k_w \cdot \frac{I_{(2)} \cdot w}{p},$$

и, соответственно, амплитуду результирующей волны МДС:

$$F_{p,m} = 1,35 \cdot k_w \cdot \frac{w}{p} \cdot (I_{(1)} + I_{(2)} \cdot e^{j3\omega_0 t}), \quad (7)$$

где k_w — основной обмоточный коэффициент для $v = 1$.

Тогда размах пульсаций амплитуды результирующей МДС с учетом выражения (7) будет определяться отношением токов основной и второй гармоник статорной обмотки:

$$\frac{F_{\max}}{F_{\min}} = \frac{(I_{(1)} + I_{(2)})}{(I_{(1)} - I_{(2)})} \quad (8)$$

В частности, к моменту окончания изображенного на рис. 2 интервала активизации геомагнитных возмущений размах пульсации

- Разнообразие конфигураций;
- ровная столешница по всей длине пульта;
- надежный стальной каркас;
- встроенные кабельные каналы для сигнальных и электрических проводов;
- лючки доступа к верхнему кабельному каналу;
- тыловой и фронтальный доступ к оборудованию;
- естественный и принудительный воздухообмен для установленного оборудования;
- модульная система энергоснабжения.



- Мягкий кант для защиты рук диспетчера во всех комплектациях;
- соответствие требованиям эргономики;
- износостойкая HPL-столешница с антистатическим покрытием;
- только качественные и профессиональные материалы;
- производство РФ.



Удобство. Надежность. Стиль.

Каждый диспетчерский пульт «АТЛАНТ» изготавливается по индивидуальному проекту. Перед отправкой к клиенту осуществляется полная предварительная сборка диспетчерского пульта, что гарантирует высокое качество поставляемого изделия.

Pult-atlant.ru
Pultatlant.ru
sales@pult-atlant.ru
+7 495 956 21 14

результатирующей МДС составит $F_{max} / F_{min} = 1,62$ [6]. Результатом взаимодействия прямой волны 1-й гармонической и обратной волны 2-й гармонической составляющих МДС является возникновение в воздушном зазоре эллиптического вращающегося магнитного поля, которое складывается из основной и второй гармонических составляющих. При отсутствии насыщения магнитной системы синхронного генератора амплитуда индукции

эллиптического вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре будет пульсировать в диапазоне, определяемом соотношением $B_{max} / B_{min} \approx 1,62$.

Поскольку тангенциальные силы, создающие синхронный электромагнитный момент, пропорциональны квадрату напряженности магнитного поля, то эллиптическое вращающееся магнитное поле будет создавать пульсирующий с частотой 300 Гц момент с размахом пульсаций $M_{max} / M_{min} = 1,62$. Пульсации электромагнитного момента будут создавать вибрации ротора и отдельных частей синхронного генератора, которые могут стать особенно заметными при наличии резонансных явлений. Следует добавить, что вращение второй гармонической составляющей магнитного поля с утроенной угловой синхронной частотой относительно ротора приводит к возникновению радиальных магнитных сил тяжения, которые перемещаются вдоль окружности воздушного зазора, создавая радиальные вибрации ротора с частотой 300 Гц.

ВЫВОДЫ

1. Гармоники тока намагничивания блочного трансформатора, возникающие при одностороннем насыщении магнитной системы под воздействием ГИТ и образующие прямую ($n = 4, 7, 10, 13, \dots$) или обратную ($n = 2, 5, 8, 11, \dots$) последовательности, трансформируются в цепи статорных обмоток синхронного генератора. Гармоники токов намагничивания нулевой последовательности ($n = 6, 12, 18, 24, \dots$) замыкаются в обмотках низкого напряжения блочного трансформатора, соединенных в треугольник, по статорным обмоткам синхронного генератора не протекают.
2. Наиболее значимой является вторая гармоника тока в цепи

статорных обмоток, которая достигает 53 % номинальной величины статорного тока, создавая угрозу срабатывания защиты обратной последовательности с типичным диапазоном уставок (0,3÷0,7) номинального тока.

3. Взаимодействие прямой волны магнитодвижущей силы от основной гармоники тока статора и обратной волны магнитодвижущей силы от второй гармоники тока статора формирует в воздушном зазоре эллиптическое вращающееся магнитное поле, амплитуда которого пульсирует с частотой 300 Гц и создает вибрации ротора, в том числе радиальные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии. / Под общ. ред. проф. МЭИ И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
2. Wik M., Viljanen A., Pirjola R., Pulkkinen A., Wintoft P., Lundsted H. Calculation of geomagnetically induced currents in 400 kV power grid in southern Sweden // Space weather. 2008. Vol. 6. S07005. Doi: 10.1029/2007 SW000343.
3. Takasu N., Oshi T., Miyawaki F., Saito S., Fujiwara Y. An experimental analysis of excitation of transformers by geomagnetically induced currents // IEEE Transactions on Power Delivery. April 1994. Vol. 9. No. 2. P. 1173–1179.
4. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. проф. МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 712 с.
5. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. М.-Л.: Энергия, 1968. 224 с.
6. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Шкурлат И.А., Галиев И.Т., Александров Н.М., Мажурин Р.В. Обеспечение электромагнитной совместимости испытательного стенда с энергосистемой для электродинамических испытаний силовых трансформаторов // Энергетик. 2017. № 11. С. 3–7.

25–28
ИЮНЯ 2019*

* Возможны изменения в сроках проведения мероприятия



РМЭФ

Российский Международный
Энергетический Форум

XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ЭНЕРГЕТИКА И
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



КЛЮЧЕВАЯ
ПЛОЩАДКА
СФЕРЫ ТЭК

реклама

RIEF.EXPOFORUM.RU

rief@expoforum.ru
+7 (812) 240 40 40, доб. 2160, 2168

EXPOFORUM

ENERGETIKA-RESTEC.RU

energo@restec.ru
+7 (812) 303 88 68



18+

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ЭКСПОФОРУМ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1