ВВЕДЕНИЕ

При несимметричных нагрузочных режимах гидрогенераторов в токах статора, кроме токов прямой последовательности (І,) возникают еще и токи статора обратной последовательности (I,) Образованное током I, поле перемещается относительно статора с синхронной скоростью обратно вращению ротора и пересекает последний с двойной синхронной скоростью.

Все отличия несимметричного режима от симметричного вызваны именно этим обратно-синхронным потоком. Пересекая замкнутые контуры ротора он вызывает в нем дополнительные потери и, кроме этого, дополнительную знакопеременную составляющую (так как пересекаются поочередно полюсы разной полярности) электромагнитного момента и радиальных сил, а также вибрацию элементов генератора с частотой 100 Гц.

Меры воздействия и характер влияния обратно-синхронного потока на режим работы генератора зависит от его конструктивного исполнения.

Роторы гидрогенераторов в тепловом отношении нагружены менее плотно, чем роторы турбогенераторов. Поэтому дополнительный нагрев ротора, вызываемый токами, наведенными обратно-синхронным полем, обычно не лимитирует степень длительной несимметрии, допустимую для гидрогенераторов.

Наиболее нагретыми оказываются демпферные стержни, демпферные перемычки, включающие гибкие связи, сегментное кольцо, по которым замыкаются токи, наведенные в демпферных обмотках.

В несимметричном нагрузочном режиме элементы конструкции

генератора, кроме основных сил (сила тяжения полюсов, силы, вызываемые неравномерным нагревом активной стали и корпуса в радиальном направлении, рабочий электромагнитный момент, а также вес частей генератора), испытывают добавочные механические воздействия с появлением токов обратной последовательности.

Это воздействие поля оценивается по двойной амплитуде вибрации с частотой 100 Гц, значение которой в симметричном режиме нормировано, а в несимметричном нагрузочном режиме должно оцениваться менее жестко и может определяться сопоставлением с данными из опыта эксплуатации, свидетельствующими о допустимости превышения амплитуды вибрации сверх нормы, установленной для долговременных режимов.

Наиболее напряженными элементами конструкции статора, воспринимающими указанные силы, являются узлы крепления активной стали к полкам жесткости корпуса, а также лобовые части обмотки. Поэтому уровень вибрации в несимметричном нагрузочном режиме проверяется в основном на активной стали и лобовых частях (главным образом частоты 100 Гц).

Для гидрогенераторов длительно допустимый ток обратной последовательности в процентах номинального регламентируется FOCT 5616-89[1]:

- статора:

• 14 – для мощности 125 MB•A; • 10 – для мощности свыше 125 МВ∙А; при непосредственном водяном охлаждении обмотки статора – 7.

ТОКИ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ В РЕЖИМАХ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ

48

АВТОРЫ:

АНАНЯНЦ С.С.. K.T.H.. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»,

MOP030B B.A.. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

инхронные генераторы рассчитаны на работу с симметричными нагрузками, когда токи в фазах практически равны между собой. Между тем в эксплуатации неизбежно возникают кратковременные несимметричные режимы работы. При работе генератора в несимметричном режиме в его статорных обмотках проходят токи прямой и обратной последовательностей.

Ключевые слова: ток, цепь, гидрогенераторы, прямая и обратная последовательности гидрогенераторов, регулирование нагрузки.



при косвенном воздушном охлаждении обмотки

ПРАКТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДО-ВАТЕЛЬНОСТЕЙ

На практике при реализации длительных режимов генераторов (работа генераторов укрупненных блоков через неполнофазную автотрансформаторную или трансформаторную группу) часто возникает необходимость определения прямой и обратной составляющих тока статора по известным токам в фазах. Ниже приводятся соотношения для некоторых практических случаев. При этом условно принимается, что наибольший ток протекает в фазе В.

Если генератор работает непосредственно на шины станции и несимметричный режим возникает в результате отключения одной фазы (случай, маловероятный в практике эксплуатации), то

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{I}_B}{\sqrt{3}},\tag{1}$$

Соотношение справедливо и в режиме установившегося двухфазного короткого замыкания (К.З.) в системе генераторного напряжения при отсутствии связи с сетью.

При работе генератора в блоке с трансформатором (автотрансформатором), обмотки которого соединены по схеме «треугольник – звезда» с изолированной нейтралью, в случае отключения одной фазы имеет место следующее соотношение:

$$I_2 = I_1 = I_A = I_C = 0.5I_{B}$$
 (2)

со стороны высокого и низкого

51





последовательностей сводится к решению косоугольных треугольников (рис. 2), для чего сначала определяются углы между сторонами треугольника (между фазными токами генератора), и фазные токи

ОПЫТНАЯ ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ТОКОВ ФАЗ ГИДРОГЕНЕРАТОРА СТ. №7 ЖИГУЛЁВСКОЙ ГЭС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ОБРАТНОЙ ПО-СЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ НАГРУЗКЕ $P=52,1 \text{ MBT}, Q=22 \text{ MBA}_{o}, I_{2}=0,123 I_{HOM}.$



Рис. 1

Условные обозначения: L-фаза вектора тока, отстающего (индуктивный) от опорного вектора напряжения $\mathbf{U}_{_{\mathbf{A}\mathbf{R}'}}\mathbf{C}$ -фаза вектора, опережающего (емкостный) опорный вектор напряжения U_{лв}.

Соотношение (2) имеет место также при установившемся двухфазном К.З. на стороне звезды блочного трансформатора (автотрансформатора).

Наиболее распространен случай, когда генератор работает в блоке с трансформатором (автотрансформатором), обмотки которого соединены по схеме «треугольник – звезда» с заземлённой нейтралью.

При этом для общего случая, когда токи в трёх фазах различны, с достаточным приближением можно принять [1]:

$$\mathbf{I}_{2} \approx \mathbf{I}_{B} - \mathbf{I}_{I} \qquad [3]$$
$$\mathbf{I}_{1} \approx \mathbf{0.55}(\mathbf{I}_{A} + \mathbf{I}_{C}) \qquad [4]$$

Наиболее всего встречаются условия, когда ток в одной из фаз превышает токи в двух других фазах, практически равные между собой $(\mathbf{I}_{A} = \mathbf{I}_{C})$. В этом случае [1]:

$$I_{2} = \frac{I_{B}}{2} - \frac{I_{A}}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{B}}{2I_{A}}\right)^{2}}, \quad (5)$$
$$I_{1} = \frac{I_{B}}{2} + \frac{I_{B}}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{B}}{2I_{A}}\right)^{2}}, \quad (6)$$

При I_D/I_A<1,7÷1,8 могут применяться следующие выражения, имеющие обычно достаточную точность [1]:

$$\mathbf{I}_{2} = \mathbf{0}, 45 \cdot \frac{\mathbf{I}_{B} / \mathbf{I}_{A} - \mathbf{1}}{\mathbf{I}_{HOM.}} \cdot \mathbf{I}_{B}, \quad (7)$$

$$I_1 = 0,426 \cdot \frac{3,3 - I_B / I_C}{I_{HOM}} \cdot I_{B}$$
 (8)

Токи прямой и обратной последовательности наиболее точно определяются опытно-расчетным методом по формулам:

$$\mathbf{I}_{2} = \frac{1}{3} \left(\mathbf{I}_{A} + \mathbf{a}^{2} \mathbf{I}_{B} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{C} \right), \quad (9)$$

$$I_{1} = \frac{1}{3} \left(I_{A} + a I_{B} + a^{2} I_{C} \right), \quad (10)$$

где: $\mathbf{a} = \mathbf{e}^{\mathbf{j}\mathbf{1}\mathbf{2}\mathbf{0}^{\circ}}$ оператор поворота вектора

В этом случае после перевода блока в несимметричный нагрузочный режим (отключение полюса выключателя на высоком напряжении трансформатора либо демонтаж одной из фаз группового трансформатора блока напряжения) снимается векторная диаграмма токов. Положение векторов токов фаз определяется по отношению к опорному линейному напряжению генератора (которое принимается за вещественную ось) при помощи электромагнитного прибора ВАФ (вольт-фазоиндикатор), а величины токов – по контрольным стационарным приборам. На рис. 1 приведён пример снятой векторной диаграммы. Поскольку этот метод связан с организационно-техническими трудностями (проведение специальной схемы перевода блока в несимметричный режим с последующим измерением токов), то был разработан несложный метод, который позволяет наиболее точно определить величины токов прямой и обратной последовательностей по известным токам фаз генератора.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕ-ЛЕНИЯ ТОКОВ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДО-ВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПО ИЗВЕСТНЫМ ТОКАМ ΦΑ3 ΓΕΗΕΡΑΤΟΡΑ

Для определения токов прямой и обратной последовательностей используется несколько видоизмененная диаграмма токов – рис. 2 [2] и известные тригонометрические формулы. Последовательность расчетных операций приведена в таблице 1.

Алгоритм расчета, приведенный в таблице 1, был реализован на программе TRIGON.

Из таблицы 1 видно, что определение токов прямой и обратной

ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ №6 (17) **ДЕКАБРЬ 2014 – ЯНВАРЬ 2015**

РАСЧЕТНАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬ-НОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРА

Условные обозначения: Z – угол, I, – ток прямой последовательности, I, – ток обратной последовательности, **а=eⁱ¹²⁰** – угол поворота вектора на 120°, $a^2 = e^{i240}$ – угол поворота вектора на 240°, $I_{\rm A}$, $I_{\rm B}$, $I_{\rm C}$ – фазные токи генератора

> генератора из скалярных величин становятся векторными.

Приведенный по разработанной методике пример расчета токов прямой и обратной последовательностей (таблица 1) по значениям фазных токов, полученных на натурных испытаниях при работе генераторов укрупненных блоков Саяно-Шушенской ГЭС через неполнофазную трансформаторную группу, при сравнении с расчетными показал их удовлетворительную сходимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ существующих соотношений для оценки токов прямой и обратной последовательностей, возникающих при несимметричных нагрузочных режимах. Выявлено, что эти соотношения зависят от схемы соединения трансформаторов энергоблоков станций, сетей и вида несимметричного режима. Токи фаз, входящие в эти формулы являются скалярными величинами, и поэтому токи прямой и обратной последовательностей рассчитанные по ним получаются с определенной погрешностью. Разработан упрощенный метод определения токов прямой и обратной последовательностей, позволяющий получить более точные их значения, поскольку учитывают фазы токов генератора. При реализации алгоритма расчетов программой TRIGON достаточно ввести значения фазных токов, и результаты получаются автоматически при нажатии команды ENTER.

ЛИТЕРАТУРА

- Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением. Под общей редакцией Мамиконянца Л.Г. и Линдорфа Л.С., М.: Энергия, 1972. П.Л. Калантаров, Л.Р. Нейман,
- 2. Теоретические основы электротехники. Часть 2. – М.-Л.: ГЭИ, 1959. 🔳

ПРИМЕР РАСЧЁТА ТОКОВ ПРЯМОЙ (I,) И ОБРАТ-НОЙ (I,) ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПРИ РАБОТЕ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ УКРУПНЁННОГО БЛОКА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС ЧЕРЕЗ НЕПОЛНОФАЗНУЮ ТРАНСФОРМАТОРНУЮ ГРУППУ

Расчетные формулы	Активная мощность, МВт, соѕф = 0,9
	180
	Токи фаз обмотки статора
	генератора, кА
	Ι _A 6,96 Ι _B 9,35 Ι _C 7,0
$\angle a = \operatorname{Arc \cos} \frac{I_B^2 + I_C^2 - I_A^2}{2I_B \cdot I_C}$, эл. градусов	47,769
$\angle b = \operatorname{Arcsin} \frac{I_b \sin \angle a}{I_A}$, эл. градусов	84,098
∠с = 180 – (∠а + ∠b), эл. градусов	48,133
∠м = 180 – ∠с, эл. градусов	131,867
∠k = 180 – ∠а, эл. градусов	132,231
$\mathbf{K} = \sqrt{\mathbf{I}_{B}^{2} + \mathbf{I}_{C}^{2} - 2\mathbf{I}_{B} \cdot \mathbf{I}_{C} \cdot \cos \angle \mathbf{k}}, \mathbf{k}\mathbf{A}$	14,98
$\angle \beta = \operatorname{Arcsin} \frac{I_{\rm C} \sin \angle k}{K}$, эл. градусов	20,243
$\mathbf{M} = \sqrt{\mathbf{I}_{A}^{2} + \mathbf{I}_{B}^{2} - 2\mathbf{I}_{A} \cdot \mathbf{I}_{C} \cdot \cos \angle \mathbf{M}}, \kappa \mathbf{A}$	14,174
$\angle \alpha = \operatorname{Arcsin} \frac{I_A \cdot \sin \angle M}{M}$, эл. градусов	20,243
∠γ = 60 − (∠α + ∠β), эл. градусов	19,515
$I_2 = \frac{1}{3}\sqrt{M^2 + K^2 - 2M \cdot K \cdot \cos\gamma}, kA$	1,668
$\angle \lambda = 60 + (\angle \alpha + \angle \beta)$, эл. градусов	100,485
$I_1 = \frac{1}{3}\sqrt{M^2 + K^2 - 2M \cdot K \cdot \cos\lambda}, kA$	7,473
Таблица 1	

Cabex – энергия успеха



Организаторы







Генеральный интернет-партнер:





ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРИЕМНИКА В УПАСК МЕЖДУ СТАТИЧЕСКИМИ ПУТЯМИ ПО ЦСПИ

55



БЕСШОВНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В ПКУС СР24 / ПКУС СР24 МОДУЛЬ СКО



Рис. 2

данные с выходов передатчиков объединяются в одном потоке E1 или C37.94 в разных тайм-слотах, а в ЦСПИ данные тайм-слоты с интерфейса E1 распределяются на два пути. На стороне приема данные в ЦСПИ объединяются в один поток E1, а в УПАСК из потока E1 или C.37.94 распределяются на входы двух приемников. Следует отметить, что бесшовное резервирование с подключением по одному интерфейсу не реализуемо на встроенных в оборудование ЦСПИ модулях C37.94, т.к. в них нет возможности кросс-коммутации тайм-слотов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованное в ПКУС СР24 и ПКУС СР24 Модуль СКО бесшовное резервирование позволяет организовывать высоконадежные каналы передачи команд РЗ и ПА часто без какого-либо увеличения стоимости решений.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ Каналов в устройствах передачи аварийных сигналов и команд

54

На правах реклам

ABTOP:

ХАРЛАМОВ В.А., К.Т.Н., ЗАО «ЮНИТЕЛ ИНЖИНИРИНГ»

Ключевые слова: релейная защита, автоматика, устройство передачи аварийных сигналов и команд, резервирование путей.

ВВЕДЕНИЕ

В системах РЗА используется передача команд РЗ и ПА, осуществляемая устройствами передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК) в том числе и по волоконно-оптическим кабелям (ВОК). Сложность использования только выделенных оптических волокон (ОВ), что является с технической точки зрения наиболее предпочтительным решением из-за его относительной простоты и надежности, состоит в лимитированном числе ОВ в ВОК и ограничениях на длину ОВ. Поэтому для передачи команд РЗ и ПА используются цифровые системы передачи информации (ЦСПИ) [1, 2]. Резервирование – один из способов повышения надежности передачи команд.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМАМИ ЦСПИ

При отказе линий связи между оборудованием ЦСПИ механизмы резервирования самих сетей обеспечивают переключение каналов на резервные пути за время до 50 мс. На это время может быть задержана и передача команд подключенными к ЦСПИ УПАСК, что неприемлемо для ряда систем РЗА.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ С ПЕ-РЕКЛЮЧЕНИЕМ В УПАСК МЕЖДУ СТАТИЧЕСКИМИ ПУТЯМИ

При резервировании, показанном на рис. 1, команды, поступившие на дискретный вход УПАСК, параллельно передаются двумя передатчиками через цифровые интерфейсы по статическим (фиксированным) основному и резервному путям. Приемник УПАСК анализирует качество принимаемых по основному пути данных и в случае его ухудшения переходит на резервный путь. При этом для принятия решения и перехода на другой путь требуется время порядка нескольких миллисекунд, что гораздо меньше, чем обеспечивают механизмы резервирования сетей. Но потеря пути может быть не полной, а частичной, т.е. возможны битовые ошибки, которые увеличат реальное время передачи водиться не будет. БЕСШОВНОЕ РЕЗЕРВИ-РОРАНИЕ В ПИХС СР2//

команд, а переключения на другой

путь, в котором ошибок нет, произ-

РОВАНИЕ В ПКУС СР24 / ПКУС СР24 МОДУЛЬ СКО На рис. 2 приведены решения

с подключением УПАСК ПКУС СР24 и ПКУС СР24 Модуль СКО к ЦСПИ по ОВ через преобразователи интерфейсов оптический/электрический ПКУС СР24 Модуль ЭОх.

Здесь поступившие на дискретный вход УПАСК команды параллельно передаются по статическим основному и резервному путям, а прием осуществляется двумя приемниками, выходы которых объединены. При отказе одного из путей работающий по нему приемник блокируется, но прием команд непрерывно осуществляется по другому, что обеспечивает бесшовное резервирование с нулевым временем переключения. Подключение УПАСК к ЦСПИ возможно как по двум интерфейсам, так и по одному. В последнем случае

ЛИТЕРАТУРА

2

Харламов В.А. Реализация цифровых каналов технологической связи для РЗА и ПА // Воздушные линии. 2013. №2. с.53-58 Харламов В.А. Каналы для релейной зациты и автоматики в сетях с пакетной коммутацией // Энергия единой сети. - 2014. №5. - с.90-93



info@uni-eng.ru, www.uni-eng.ru