

А.В. Солдатов, В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет,
г. Чебоксары, НПП «ЭКРА»)

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ТОКА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА КАК ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Высшие гармоники тока являются информационными сигналами для защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью [1]. Природа возникновения высших гармоник в электрической сети синхронного генератора (генераторной сети) двояка. В одних схемах, в таких, как блок генератор-трансформатор или укрупненный блок, преобладают высшие гармоники, возникающие, главным образом, из-за нелинейности магнитной системы генератора, т.е. их источник находится в генераторной сети. В других схемах, например, в схемах работы генератора на сборные шины, в генераторную сеть будут еще инжектированы гармоники из примыкающей к шинам электрической сети. Однако релейная защита не способна распознать различие в природе возникновения высших гармоник. В то же время, как показывает анализ алгоритмов защит от замыканий на землю, источники высших гармоник, расположенные вне генераторной сети, благоприятствуют повышению чувствительности защиты и не влияют на ее селективность [2]. Очевидно, что релейная защита, обеспечивающая правильную работу в схеме, когда источник высших гармоник локализован в генераторной сети, сохранит свои функциональные возможности и в схемах, когда в генераторную сеть инжектируются высшие гармоники из примыкающей сети. Отсюда следует, что с точки зрения чувствительности защит случай, когда генератор является единственным источником высших гармоник, является расчетным.

В связи с этим в настоящем докладе анализируется высшие гармоники синхронного генератора, как источника информационных сигналов релейной защиты.

Существует два типа генераторов: турбо- и гидрогенераторы. Для турбогенераторов характерна высокая частота вращения. Обмотка возбуждения равномерно уложена в пазы сердечника ротора, и на высокой скорости вращения такой ротор испытывает меньшие динамические нагрузки. Воздушный зазор δ между статором и ротором турбогенератора практически постоянен (рисунок 1, а)), и ротор не имеет явно выраженных полюсов, в связи с чем распределение магнитной индукции в воздушном зазоре вокруг ротора имеет трапецеидальный вид. По этой причине ЭДС генератора и во времени изменяется по трапецеидальному закону.

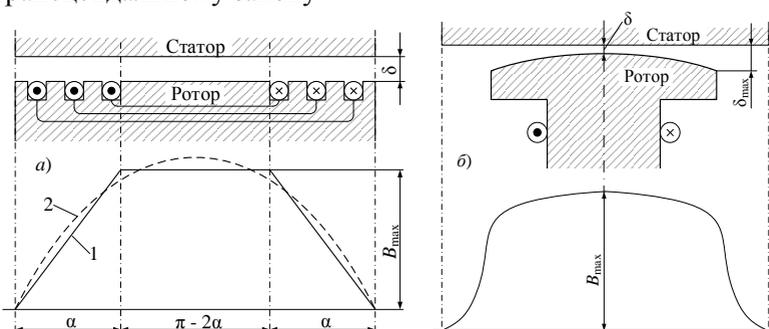


Рисунок 1 - Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре: а) – турбогенератора (1 – индукция B , 2 – первая гармоника индукции B_1); б) – гидрогенератора

Гидрогенераторы имеют низкую частоту вращения. Их ротор представляет собой магнитную систему с явно выраженными магнитными полюсами. Края полюсов скошены с таким расчетом ($\delta_{max} \approx 1,5\delta$), чтобы распределение магнитной индукции в зазоре максимально приближалось к синусоиде (рисунок 1, б)).

Из-за симметрии магнитной системы индукция генератора содержит только нечетные гармоники. Учитывая трапецеидальность формы, индукция в зазоре в окрестности фазных обмоток статора генератора может быть представлена в виде слагаемых гармонического ряда с амплитудами

$$B_\nu = \frac{4B_{max}}{\pi\alpha\nu^2} \sin(\nu\alpha), \quad (1)$$

где B_{\max} – амплитуда индукции в зазоре; α – половина угловой длины дуги, на которой располагается обмотка возбуждения; ω – угловая частота основной гармоники; $\nu = 1, 3, 5, \dots$ – номер гармоники.

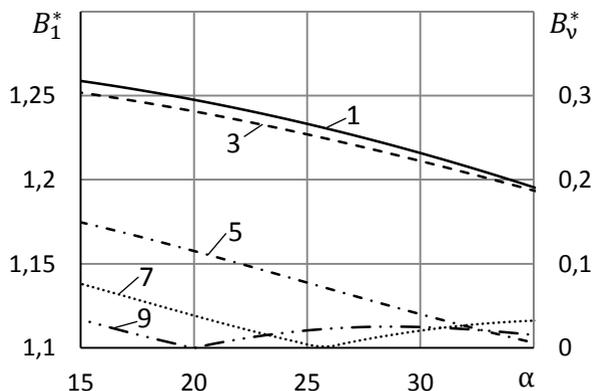


Рисунок 2 – Зависимости уровней гармоник B_v^* от α . Номер кривой соответствует номеру гармоники. Для гармоник с номерами 3, 5, 7 и 9 используется правая шкала.

Зависимости относительных уровней гармоник B_v^* от угловой длины α представлены на рисунке 2. Для наглядности амплитуда первой гармоники индукции B_1 отнесена к амплитуде индукции B , амплитуды высших гармоник B_v – к амплитуде 1-й гармоники B_1 . Видно, что с увеличением α удельное содержание высших гармоник генератора снижается, что непременно скажется на чувствительности защит от однофазных замыканий на землю.

Значение α определяется конфигурацией ротора генератора [3]. Для неявнополюсных генераторов нормальное значение α , как правило, равно $32,4^\circ$, а для явнополюсных – находится в пределах $24,3^\circ \div 28,8^\circ$. Насыщение магнитопровода статора генератора может приводить к снижению расчетной величины α до 18° .

Для генераторов с сосредоточенной диаметральной обмоткой статора уровни гармоник ЭДС пропорциональны уровням гармоник индукции (1):

$$E_{v,D} = \frac{4E_{\max}}{\pi\alpha\nu^2} \sin(\nu\alpha), \quad (2)$$

где E_{\max} – амплитуда ЭДС.

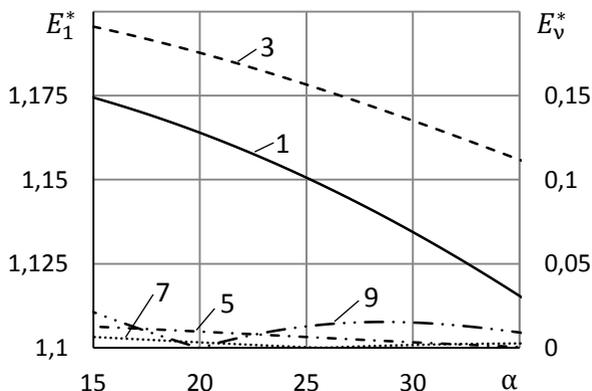


Рисунок 3 – Зависимости уровней гармоник E_v^* от α с учетом обмоточного коэффициента. Номер кривой соответствует номеру гармоники. Для гармоник с номерами 3, 5, 7 и 9 используется правая шкала.

Для снижения уровня высших гармоник в ЭДС обмотку укладывают в пазы статора с укороченным шагом и распределяют по пазам специальным образом [3]. Величина ЭДС такой обмотки может быть определена через ЭДС сосредоточенной обмотки с диаметральной шагом (2) как

$$E_v = E_{v,D} k_{об,v},$$

где

$$k_{об,v} = k_{y,v} k_{p,v} -$$

обмоточный коэффициент,

$$k_{y,v} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta \nu\right) -$$

коэффициент укорочения шага обмотки,

$$k_{p,v} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}v\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{6q}v\right)}$$

коэффициент распределения обмотки, β – относительный шаг обмотки по отношению к полюсному делению, обычно $0,79 \div 0,84$, q – число пазов на полюс и фазу, как правило, в пределах от 2 до 5.

В качестве примера на рисунке 3 приведена зависимость уровня гармоник E_v^* от α с учетом обмоточного коэффициента при значениях $\beta=0,833$ и $q=2$ (гидрогенераторы Чебоксарской ГЭС).

ЭДС фаз генератора во времени меняется следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} e_A(t) \\ e_B(t) \\ e_C(t) \end{Bmatrix} = \sum_{v=1,3,5,\dots} E_v \begin{Bmatrix} \sin(v\omega t) \\ \sin(v\omega t + \frac{4}{3}v\pi) \\ \sin(v\omega t + \frac{2}{3}v\pi) \end{Bmatrix},$$

Видно, что группы гармоник, для которых выполняется условие деления нацело $(v-1)/3$ (гармоники с номерами $v = 1, 7, 13$ и т.д.), являются составляющими прямой последовательности, $(v+1)/3$ (гармоники с номерами $v = 5, 11, 17$ и т.д.) – составляющими обратной последовательности, $v/3$ (гармоники с номерами $v = 3, 9, 15$ и т.д.) – составляющими нулевой последовательности.

Несинусоидальность формы кривой ЭДС генератора приводит к появлению высших гармоник и в токе. Величина тока зависит от параметров электрической сети и, как правило, определяется ее емкостной проводимостью [4].

Таким образом, высшие гармоники, порождаемые синхронным генератором, представляют собой широкий информационный базис для релейной защиты генератора от замыканий его обмотки на землю.

Литература

1. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Егоров Н.В. Оценка гармоники электрической величины на фоне

преобладающего гармонического спектра шума. /
Электричество. 2014. №5. С. 29-33.

2. *Кискачи В.М.* Новые направления выполнения селективной защиты от однофазных замыканий на землю генераторов и сетей 6-35 кВ. / Электрические станции. 1994. №10. С.10-15.

3. *Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.* Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – (Основы наук).

4. *Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Сандомиров А.Ю.* Токи высших гармоник в генераторной сети при однофазных замыканиях на землю / (доклад в этом же сборнике).