

им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике». E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Романов Дмитрий Петрович, магистрант ПНИПУ по направлению «Интегрированные системы управления производством». Окончил в 2020 г. электротехнический факультет ПНИПУ, получил степень бакалавра по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств». E-mail: romanov-dp@bk.ru.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ТОКОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Кудряшова М.Н., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Иванов М.О., Солдатов А.В., Антонов В.И., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Аннотация: *Селективность защиты генератора от однофазного замыкания на землю повышается при использовании в качестве контролируемых величин высшие гармоники в дифференциальном токе. Расчетным режимом защиты от однофазных замыканий на землю является режим работы генератора на холостом ходу. В работе анализируются уровни высших гармоник для случая, когда генератор является единственным их источником.*

Ключевые слова: *защита от однофазных замыканий на землю высшие гармоники тока, турбогенератор.*

Известно, что высшие гармоники тока представляют собой широкий информационный базис для релейной защиты от однофазных замыканий на землю [1]. В случае работы турбогене-

ратора параллельно с сетью источником высших гармоник является вся электрическая сеть. Поэтому в этом режиме уровень высших гармоник, поступающих на вход защиты турбогенератора от ОЗЗ, достаточно высок. Однако в случае работы генератора на холостом ходу уровень высших гармоник в генераторной сети полностью определяется только самим генератором. В таком режиме работы у генератора внешние присоединения отсутствуют, и токи однофазного замыкания на землю обуславливаются ёмкостным током самого генератора. Такой режим можно рассматривать как расчётный для определения чувствительности защиты генератора от однофазных замыканий на землю.

Целью настоящей работы является оценивание уровня высших гармоник для защиты от однофазных замыканий на землю [2] в режиме холостого хода синхронного генератора, работающего на сборные шины.

Уровень высших гармоник в ёмкостном токе генератора, работающего на холостом ходу, полностью определяется ЭДС высших гармоник самого генератора [1]. Расчётная формула имеет вид:

$$E_v = \frac{4E_{\max}}{\alpha \pi v^2} \sin(v\alpha) \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta v\right) \frac{\sin \frac{\pi}{6} v}{q \sin \frac{\pi}{6q} v} \quad (1)$$

где v – номер гармоники; $E_{\max} = U_{\text{ном,л}} / \sqrt{3}$ – амплитуда ЭДС; $U_{\text{ном,л}}$ – номинальное напряжение; α – половина угловой длины, на которой располагается обмотка возбуждения; β – относительный шаг обмотки по отношению к полюсному делению; q – число пазов на полюс и фазу.

С учетом ЭДС (1) ёмкостной ток определяется по формуле:

$$I_v = 2\pi f v C E_v \quad (2)$$

где f – частота основной гармоники, C – ёмкость на фазу.

Результаты расчёта уровня токов высших гармоник для различных турбогенераторов приведены в таблице. Номинальные характеристики турбогенераторов были взяты из [3].

Как видно из таблицы, уровень токов высших гармоник генератора на холостом ходу сравнительно мал. Отношение уровней, например, третьей и основной гармоник будет около 10^{-6} . Измерение высших гармоник потребует от тракта аналогоцифрового преобразования устройства защиты исключительных технических характеристик [0, 0].

Таблица

Уровень токов высших гармоник типовых турбогенераторов

Тип ТГ	$U_{ном,л}$, кВ	$I_{ном}$, кА	Ток v -ой гармоники I_v , мА			
			3	5	7	9
Т2-6-2	3,15	1,376	0,91	0,23	0,18	0,32
	6,3	0,688	1,46	0,36	0,28	0,51
Т2-12-2	6,3	1,375	10,99	0,24	1,23	2,27
	10,5	0,825	7,26	0,23	1,66	3,22
Т2-25-2	6,3	2,86	15,10	0,68	1,03	3,9
	10,5	1,72	14,38	0,62	4,13	7,48
Т2-50-2	10,5	3,24	7,72	2,6	7,91	5,13
	10,5	3,24	26,17	0,43	5,25	11,43
ТВ-50-2	10,5	3,44	7,72	2,6	7,91	5,13
	10,5	3,44	26,17	0,43	5,25	11,43
ТВ2-30-2	6,3	3,44	15,10	0,68	1,03	3,9
	10,5	2,06	14,38	0,62	4,13	7,48
ТВ-60-2	10,5	4,125	7,72	2,6	7,91	5,13
	10,5	4,125	26,17	0,43	5,25	11,43
ТВ2-100-2	13,8	4,925	19,01	13,24	6,97	14,25
ТВ2-150-2	18	5,35	33,69	5,09	17,66	21,64
ТВС-30	6,3	3,44	9	0,39	2,59	4,68
	10,5	2,06	15,00	0,64	4,31	7,8
ТВФ-60-2	6,3	6,85	0	2,48	1,29	0
	10,5	4,12	15,05	0,74	1,93	7,07
ТВФ-100-2	10,5	6,475	0	4,81	2,48	0
ТВФ-63-2	10,5	4,33	20,57	5,15	1,09	6,36
ТВФ-63-2Е	10,5	4,33	16,75	4,19	0,89	5,18
ТВФ-120-2	10,5	7,76	0	4,81	2,48	0

Тип ТГ	$U_{ном,л}$, кВ	$I_{ном}$, кА	Ток v -ой гармоники I_v , мА			
			3	5	7	9
ТВВ-200-2А	15,75	8,625	13,97	5,76	3,85	4,72
ТВВ-320-2	20	10,2	21,34	4,35	11,27	9,79
ТВВ-500-2	20	17	9,81	8,97	5,31	3,43
ТГВ-200	15,75	8,63	20,2	0	15,22	11,04
ТГВ-200М	15,75	8,625	15,95	0	12,72	9,67
ТГВ-300	20	10,2	27,57	0	20,77	15,07

Выводы

Расчетным режимом защиты генератора от однофазных замыканий на землю является режим работы генератора на холостом ходу. В этом режиме токи высших гармоник полностью определяются ЭДС генератора на высших гармониках и собственной емкостью фаз генератора. Неизмеримо малый уровень этих токов требует применения в устройствах защиты генератора от замыкания на землю измерительного тракта с исключительно высокими техническими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солдатов А.В.* Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока / А.В. Солдатов, В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов, М.И. Александрова // Релейная защита и автоматизация. 2016, №3(24). С. 12-20.

2. *Солдатов А.В.* Способ защиты генератора от замыканий на землю / А.В. Солдатов, В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов // Патент России №2658645. 2018. Бюл. №18.

3. Справочник по ремонту турбогенераторов / Под ред. д.э.н., проф. Х.А. Бекова, к.э.н., проф. В.В. Барило. М.: ИПКГосслужбы, ВИПКЭнерго, 2006г, 724 стр.

4. 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.

5. Антонов, В.И. Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю / В.И. Антонов [и др.] // Электрические станции. 2018. №1. С. 52-55.

Авторы:

Кудряшова Мария Николаевна, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончила в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получила степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: kudryashova_mn@ekra.ru.

Иванов Михаил Олегович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получила степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: ivanov_mo@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА», старший преподаватель кафедры ЭИЭС имени А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил диплом инженера на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2006 г. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», профессор кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.