



Богуславский И. З., Забоин В. Н., Попов В. В.

I. Z. Boguslavsky, V. N. Zaboин, V. V. Popov

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ИХ РАБОТЕ В СОВРЕМЕННЫХ СЕТЯХ

ON ENSURING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF HIGH-POWERED ELECTRICAL MACHINES IN MODERN NETWORKS



Богуславский Илья Зеликович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: b-iz@yandex.ru

Mr. Ilya Z. Boguslavsky – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Electrical Machines, St.-Petersburg State Polytechnic (Russia, St.-Petersburg). E-mail: b-iz@yandex.ru



Забоин Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: zabv@rambler.ru

Mr. Valeriy N. Zaboин – Dr.habil. of Engineering, Professor, Head of the Department of Electrical Machines, St.-Petersburg State Polytechnic (Russia, St.-Petersburg). E-mail: zabv@rambler.ru



Попов Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: em_dep@spbstu.ru

Mr. Victor V. Popov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Electrical Machines, St.-Petersburg State Polytechnic (Russia, St. Petersburg). E-mail: em_dep@spbstu.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние на допустимую мощность электрической машины гармонического состава тока статора при ее работе в нелинейной сети. Получено обобщающее уравнение для расчета указанной мощности с учетом основных и дополнительных потерь в обмотке статора и в стали машины. Предложено упрощенное выражение для оценки провала напряжения генератора при внезапном изменении его нагрузки. Даны практические рекомендации по обеспечению требуемого уровня провала напряжения в действующих и во вновь создаваемых генераторах автономных систем.

Summary. The paper considers how the harmonic composition of electric current impacts the allowable output of an electric machine operating in a non-linear network. We propose a generalized equation for the calculation of this output taking into account the main/additional power losses in the stator's winding and in the steel of the machine. We propose a simplified expression for calculating an AC generator's voltage dip at sudden load changes. Practical recommendations are offered to ensure a required level of voltage dip in already operating and newly designed stand-alone systems' power generators.

Ключевые слова: электрическая машина, допустимая мощность, гармонический состав, нелинейная сеть, потери, генератор, провал напряжения, наброс нагрузки, практические рекомендации.

Key words: electrical machine, allowable output, harmonic composition, nonlinear network, losses, power generator, voltage dip, load surge, practical recommendations.

УДК 621.313.3

Введение

Эксплуатация электрических машин переменного тока в современных электрических сетях с нелинейными элементами характеризуется возрастанием высших гармонических со-



ставляющих тока статора в них по сравнению с работой в линейных сетях, что приводит к увеличению добавочных потерь в конструктивных элементах машин и появлению дополнительных моментов на их валу. В результате повышаются нагревы обмоток и активной стали в машинах, усиливаются вибрации их корпусов. Возникающие при этом проблемы обеспечения эксплуатационной надежности машин приходится решать довольно часто, так как современная преобразовательная техника все шире внедряется в различные отрасли промышленности, транспорта и сельского хозяйства. К числу таких проблем относятся, в частности, проблемы определения допустимых режимов работы машин по мощности и ограничения снижения напряжения генераторов автономных систем при внезапных изменениях их нагрузки. Изложению результатов решения этих проблем в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и посвящена настоящая обобщающая статья.

Определение допустимой мощности машины переменного тока при работе ее в нелинейных электрических сетях

Необходимость ограничения мощности машин в сетях с нелинейными элементами обусловлена тем, что высшие временные гармонические составляющие токов в статоре вызывают добавочные потери в активной части машины, ее нагрев, шумы и вибрации. Эти гармонические индуцируют в обмотке и активной стали статора ЭДС и токи частотой $f_v = f_1 \cdot v$, где f_1 – частота первой ($v = 1$) гармонической составляющей тока (основная частота сети), а $v = 6k \pm 1$ ($k = 1, 2, \dots$) – порядок его высших гармонических.

Рассмотрим в качестве примера, представляющего наибольший практический интерес, работу генератора в нелинейной сети с гармоническими $v = 5$ и $v = 7$. Будем полагать также, что коэффициент Филда обмотки статора генератора равен $k_{F1} = 1,2$ при основной частоте ($v = 1$) 50 Гц. Из-за указанных высших гармонических составляющих тока основные и добавочные потери в обмотке статора этого генератора увеличатся приблизительно в 1,25 – 1,3 раза [1]. Возрастут также потери в активной стали статора и ротора. Для сохранения перегрева обмотки статора, согласно ГОСТ Р 52776 [2], необходимо будет снизить мощность генератора в рассматриваемом случае примерно в 1,15 раза (без учета потерь в роторе).

В самом общем случае допустимую мощность машины $P_{\text{доп}}$ при работе ее в нелинейных сетях удобно в практических расчетах представлять в долях ее модельной мощности $P_{\text{мод}}$, определяемой заводом-изготовителем для работы в линейной сети с номинальным значением коэффициента мощности. Причем $P_{\text{доп}}$ следует считать относительным значением номинальной мощности машины с известным (расчетным или опытным) гармоническим составом тока статора.

Мощность $P_{\text{доп}}$ можно представить в виде произведения двух сомножителей $P_{\text{дм}}$ и $P_{\text{дс}}$, первый из которых будет учитывать уменьшение модельной мощности из-за возрастания потерь в обмотке статора (потерь в меди), а второй – потерь в активной стали статора и ротора. Произведя преобразования приведенных в [3] уравнений, можно из условия равенства потерь (сохранения перегревов) при работе в линейных и нелинейных сетях получить выражение для расчета $P_{\text{дм}}$ в виде

$$P_{\text{дм}} = \sqrt{\frac{k_{F1}}{\sum k_v^2 + (k_{F1} - 1) \sum k_v^2 \cdot v^2}}, \quad (1)$$

где k_{F1} – коэффициент Филда; k_v – отношение амплитуды v -й гармонической тока к амплитуде его первой гармонической.

Выполняя аналогичные преобразования с соответствующими уравнениями [3], выражение для определения $P_{\text{дс}}$ можно записать как

$$P_{\text{дс}} = \frac{1}{\sqrt{\sum k_{sv}^2 \cdot k_v^2 \cdot v^{1.3}}}, \quad (2)$$

где $k_{sv} = s_v / s_1$; s_v равно отношению амплитуд v -х гармонических МДС результирующего магнитного поля $F_{\delta v}$ и поля обмотки статора F_{av} [3, 4] к коэффициенту насыщения магнитной цепи k_{μ} .



С учетом (1) и (2) обобщающая формула для расчета допустимой мощности машины $P_{\text{доп}}$ приобретает вид

$$P_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{k_{F1}}{(\sum k_{sv}^2 \cdot k_v^2 \cdot v^{1.3}) \cdot (\sum k_v^2 + (k_{F1} - 1) \cdot \sum k_v^2 \cdot v^2)}} \quad (3)$$

Полученное выражение, как отмечалось выше, не учитывает потери в обмотках ротора, а поэтому для асинхронных машин с фазным ротором необходимо проводить проверку перегрева его обмотки ротора в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776 [2]. Несмотря на то, что перегрев стержней клетки ротора в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором стандартами не нормируется (ограничивается лишь величиной 200 – 250 °С), в двигателях большой мощности с тяжелыми условиями эксплуатации необходимо также оценивать тепловую напряженность обмотки ротора [9]. Опыт эксплуатации синхронных машин показывает, что дополнительная проверка перегрева обмотки ротора и в них необходима, если в нелинейной сети значения $\cos\varphi < 0,7$.

Важно подчеркнуть, что в синхронных машинах входящая в (2) и (3) величина s_1 обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря x_{ad} , а в асинхронных и синхронных двигателях с полной демпферной системой она меньше 0,1 [3]. Однако при $s_v < 1$ соответствующая (первая) сумма в знаменателе (3) и значение $P_{\text{дс}}$ в (2) стремятся к 1, а поэтому в практике инженерных расчетов достаточно учитывать снижение модельной мощности машины лишь из-за возрастания потерь в обмотке статора, определяя его по (1), или полагать $P_{\text{дс}}$ равным 0,95 – 0,9 при коэффициентах искажения формы тока $k_i > 1,2$.

В качестве примера количественной оценки допустимой мощности машины при нелинейном характере изменения тока в обмотке статора в табл. 1 приведены результаты расчета $P_{\text{доп}}$ по (3) для машины с трапецидальной формой тока при варьировании соотношения оснований трапеции k_{oc} и различных значениях k_{F1} .

Таблица 1

k_{F1}	$P_{\text{доп}}$		
	$k_{oc} = 0,77$	$k_{oc} = 0,66$	$k_{oc} = 0,55$
1,075	0,90	0,93	0,95
1,150	0,88	0,92	0,94
1,250	0,85	0,91	0,93

Из анализа данных, представленных в табл. 1, следует, что по мере уменьшения верхнего основания трапеции (уменьшения амплитуд гармонических составляющих тока) мощность $P_{\text{доп}}$ может быть увеличена до 0,93 – 0,95. Для уменьшения амплитуд высших гармонических тока статора мощных двигателей применяют двенадцатипульсную схему инвертора вместо мостовой шестипульсной схемы, а в генераторах используют шестифазную обмотку (две «звезды» со сдвигом в 30°) вместо трехфазной. При питании двигателей от частотных преобразователей с ШИМ регулятором для защиты изоляции обмотки статора используют фильтры высших ($v > 19$) гармонических.

Проблема обеспечения переходного отклонения напряжения генератора при внезапном изменении его нагрузки

Одним из основных требований эксплуатации к синхронным генераторам автономных систем электроснабжения является ограничение величины переходного отклонения напряжения при сбросе – набросе нагрузки. Например, для низковольтных дизельных генераторов судовых электростанций провал напряжения ΔU из режима холостого хода не должен превосходить 15 % при нагрузке $P_2 = 60$ % от полной мощности генератора, время восстановления напряжения $T \leq 1,5$ с, а точность его поддержания не менее ± 3 % от номинального значения [5, п. 10.6.2.2]. Однако современные тенденции сокращения веса и габаритов синхронных генераторов за счет повышения уровня их электромагнитного использования вступают в противоречия с этими требованиями эксплуатации. Исследование данной проблемы позволя-



ет наметить пути ее решения как на стадии проектирования генераторов, так и в процессе их эксплуатации.

Используя изложенные в [6, 7] расчетные формулы и результаты обработки экспериментальных данных для ряда мощных бесщеточных дизельных генераторов, можно получить приближенное выражение для определения провала напряжения ΔU при набросе 100% нагрузки с $\cos\varphi \leq 0,4$ в виде

$$\Delta U \approx x^*/(1 + x^*), \quad (4)$$

где x^* – величина расчетного индуктивного сопротивления, лежащая в диапазоне от значения сверхпереходного индуктивного сопротивления x_d'' до значения переходного индуктивного сопротивления x_d' по продольной оси. Так, например, при набросе 80 % нагрузки и $\cos\varphi = 0,3$ в генераторе мощностью 625 кВА с $x_d'' = 0,12$ и $x_d' = 0,17$ реальный провал напряжения составил 9,85 %, а его значение по (4) равно 10,7 %. При $\Delta U = 15$ % из (4) следует, что предельное значение x^* должно быть не более 0,18. Следовательно, задача снижения ΔU сводится, по существу, к уменьшению сопротивлений по путям рассеяния продольного магнитного потока обмотки статора, так как известно [1], что

$$x_d'' = x_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma yd}}}, \quad (5)$$

где x_{ad} – индуктивное сопротивление продольной реакции якоря, а $x_{\sigma a}$, $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma yd}$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря, возбуждения и демпферной (успокоительной).

Все входящие в (4) индуктивные сопротивления могут быть представлены в виде отношения линейной токовой нагрузки статора A к амплитуде первой гармонической индукции магнитного поля в зазоре $B_{\delta 1}$, умноженного на коэффициент пропорциональности, учитывающий геометрию и степень насыщения путей рассеяния магнитных потоков от соответствующих обмоток [1]. Поэтому для снижения ΔU необходимо уменьшать проводимости для потоков рассеяния или величину отношения электромагнитных нагрузок $A/B_{\delta 1}$.

Практика расчетов современных генераторов автономных электростанций подтверждает, что первая из отмеченных возможностей позволяет уменьшить ΔU не более чем на 5-6 %. Если же провал напряжения генератора превышает допустимый уровень на эту величину, то необходимо рассматривать и вторую возможность. Она, на первый взгляд, весьма эффективна, поскольку, при постоянной мощности в заданных габаритах активной части машины, возрастание в k раз $B_{\delta 1}$ и соответствующее уменьшение A (для сохранения неизменным тягового усилия – коэффициента Эссона) приводят к снижению x^* в k^2 раз. Однако соответствующие расчеты показали, что таким способом можно уменьшить ΔU лишь на 10-12 %, а дальнейшее увеличение k приводит к недопустимым перегревам обмоток, ухудшению электромагнитного использования и эксплуатационных показателей генератора.

Таким образом, повышение уровня электромагнитного использования генераторов за счет возрастания A с целью снижения их массы G_g и габаритов V_g (повышение конкурентоспособности на рынке) приводит, как правило, к увеличению провала напряжения $\Delta U \equiv 1/V_g \equiv 1/G_g$, превосходящего эксплуатационные требования стандартов [5].

Для вновь создаваемых генераторов автономных систем энергоснабжения с $x_d' > 0,18$ решение рассматриваемой проблемы возможно лишь приведением достигнутого уровня их индуктивных сопротивлений в соответствие с потребной в эксплуатации величиной провала напряжения ΔU , подобно тому, как это сделано для современных турбогенераторов в отношении x_d' [8]. Для каждой из возможных групп мощностей необходимо установить допустимую нагрузку, набрасываемую на генераторы из режима холостого хода. Количество таких групп может быть и больше трех, принятых [8] для турбогенераторов.

Для генераторов, находящихся в эксплуатации, эту проблему следует решать путем выделения из группы потребителей двух – трех подгрупп, отличающихся степенью их технологической необходимости. Последовательность и временные интервалы подключения этих подгрупп нетрудно рассчитать и автоматизировать. Причем запускать каждую после-



дующую подгруппу можно при достижении предыдущей подгруппой величины напряжения, меньшей номинальной. В результате могут быть достигнуты требуемые в эксплуатации значения провала $\Delta U_{гр} < 15\%$ при высоком уровне электромагнитного использования генератора в группе ($x'_d \approx 0,35 - 0,40$), поскольку эквивалентные индуктивные сопротивления группы пропорциональны отношению подключаемой мощности $P_{2гр}$ к мощности $P_{1ном}$ генератора, то есть $x_{гр}^* = x^* \cdot P_{2гр} / P_{1ном}$ и, как следствие из (4), $\Delta U_{гр} < \Delta U$.

Если выделение подгрупп не представляется возможным, то генератор выбирается подобно тому, как это делается для обеспечения «тяжелого запуска» асинхронного двигателя с большими значениями динамического момента инерции приводного механизма. В частности, для ограничения провала напряжения модельная мощность генератора $P_{1мод}$ принимается больше номинальной мощности $P_{1ном}$ так, чтобы эквивалентное значение $x''_{dмод} = x''_{dном} P_{1ном} / P_{1мод}$ было достаточным для обеспечения требуемого ΔU .

Выводы

1. Предложено обобщающее выражение для расчета допустимой мощности машины переменного тока $\bar{P}_{доп}$, позволяющее количественно оценить необходимое уменьшение ее номинальной мощности при работе в нелинейных сетях с известным гармоническим составом тока статора.

2. Тенденция к повышению уровня электромагнитного использования генераторов противоречит эксплуатационным требованиям действующих стандартов в отношении допустимой величины провала напряжения генератора ΔU при внезапном изменении его нагрузки.

3. Для вновь создаваемых генераторов автономных систем необходимо изменить эксплуатационные требования стандартов к величине ΔU или к значению набрасываемой нагрузки P_2 с учетом достигнутых в генераторах уровней электромагнитных нагрузок и параметров.

4. Требуемой величины ΔU в действующих автономных сетях можно достичь, разбивая нагрузку на подгруппы с $P_{2гр}$ или увеличивая мощность генератора $P_{1ном}$ до $P_{1мод}$, учитывая пропорциональность эквивалентных индуктивных сопротивлений отношению $P_{2гр} / P_{1ном}$ или $P_{1мод} / P_{1ном}$ соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. — СПб.: Питер, 2008. — 350 с.
2. ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60 034-1-2004). Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. — Введ. 2008-01-01. — М.: Госстандарт России, 2004. — 74 с.
3. Богуславский, И. З. Метод определения допустимой мощности двигателя переменного тока при работе в нелинейной сети / И. З. Богуславский // Электротехника. — 2009. — № 5. — С. 22-28.
4. Особенности создания и эксплуатации мощных машин переменного тока в автономных электросетях / И. А. Арсеньев, И. З. Богуславский, В. В. Попов, В. В. Суханов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2013. — № 4-1 (183). — С. 41-48.
5. НД № 2-020101-072. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2. — Введ. 2013-01-01. — СПб.: Российский морской Регистр судоходства, 2013. — 718 с.
6. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. — Л.: Энергия, 1980. — 256 с.
7. Рюденберг, Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок / Р. Рюденберг. — Л.: Энергия, 1981. — 578 с.
8. ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия. — Введ. 2002-01-01. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 24 с.
9. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Ученые записки КНАГТУ. — 2013. — № IV-1(16). — С. 29-34.