



УДК 621.311.24

АНТОНОВ А.Е., доктор. техн. наук,  
Ин-т электродинамики НАН України, м. Київ

## ПОСТРОЕНИЕ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА С МАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

*Рассмотрена возможность построения синхронного турбогенератора, магнитный поток ротора которого возбужден высококоэрцитивными постоянными магнитами. Отмечены проблемные вопросы и определены возможные пути их решения. Определены основные размеры активной зоны преобразования для генератора мощности 1,8 МВт*



Одним из возможных путей решения проблемы дальнейшего повышения КПД и ресурса синхронных турбогенераторов может стать применение для возбуждения потока ротора постоянных магнитов. Перспективность такого пути определяется двумя основными факторами. Первый из них — появление высококоэрцитивных интерметаллических соединений на основе композиции NdFeB, обладающих максимальной на сегодняшний день удельной магнитной энергией до  $300 \text{ кДж/м}^3$  при доступной стоимости. Второй — успехи в практическом построении многоуровневых силовых инверторов, работающих в мегаваттном диапазоне мощностей [5]. Очевидными преимуществами магнитного способа возбуждения являются отсутствие затрат электроэнергии на возбуждение потока, отсутствие щеточно-коллекторного узла для передачи энергии на вращающуюся часть и связанных с ним потерь. Отсутствие щеточно-коллекторного узла обуславливает также и более высокую надежность конструкции. Сравнительный анализ магнитного и электромагнитного способов возбуждения для материала с параметрами  $B_r = 1,2 \text{ Тл}$ ;  $H_c = 800 \text{ кА/м}$ , показал, что при плотности тока в обмотке  $5 \text{ А/мм}^2$  и равных габаритах систем возбуждения значения индукции в воздушном зазоре при электромагнитном способе возбуждения составляют лишь 4% от уровней индукции, создаваемых в сопоставимых точках системы с постоянным магнитом [1]. Там же показано, что в оптимально построенной электромагнитной системе для увеличения магнитного потока до уровня потока магнитной системы при сохранении интенсивности теплоотдачи все габаритные размеры электромагнита должны быть пропорционально увеличены почти в 2,8 раза. Таким образом, генератор с магнитным возбуждением потока имеет более высокую габаритную мощность и улучшенные массо-габаритные характеристики. Положительным качеством современных материалов на основе NdFeB является также расширенный до  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$  ра-

бочий температурный диапазон, для которого величина коэффициента обратимых изменений индукции составляет  $0,07...0,13 \text{ } [\%/^\circ\text{C}]$ . Поэтому при использовании соответствующих термостойких изоляционных материалов могут быть снижены требования к системе охлаждения генератора.

Использование высококоэрцитивных магнитных материалов в генераторе делает возможным реализовать беспазовую компоновку статора генератора с относительно большим воздушным зазором, но с достаточно высокой, тем не менее, средней плотностью магнитного потока в зазоре, которая может достигать  $0,45...0,5 \text{ Тл}$ . При этом длина воздушного зазора в оптимально построенной электромеханической системе сопоставима с длиной постоянного магнита вдоль оси его намагничивания [2]. Увеличенный воздушный зазор в сочетании с низкой магнитной проницаемостью композиции NdFeB ( $\mu \approx 1,03 \dots \mu_0$ ) определяет существенно более низкую индуктивность обмотки и незначительную реакцию якоря. Беспазовая компоновка статора существенно упрощает также технологию изоляции обмотки от шихтованного набора статора и технологию его сборки в целом.

Вместе с тем, применение для возбуждения ротора высококоэрцитивных материалов создает определенные проблемы, связанные со стабильностью напряженности магнитного поля возбуждения и обратной зависимостью напряжения на выходе генератора от электрической нагрузки. Становится невозможным регулирование потока ротора теми методами, которые применяются в синхронных генераторах с роторной обмоткой при электромагнитном способе возбуждения. Для стабилизации уровня выходного напряжения при колебаниях нагрузки необходимо использовать схему, предполагающую выпрямление выходного напряжения и последующее его инвертирование. Долгое время это было невозможно из-за отсутствия технических средств, позволяющих производить подобные преобразования в мегаваттном



диапазоне. Сегодня эта проблема уже может быть решена с помощью многоуровневых высоковольтных инверторов напряжения с ШИМ модуляцией с использованием ячеек на базе IGBT – элементов [5].

При формировании активной зоны генератора воспользуемся результатами оптимизации многополюсных машин магнитоэлектрического типа [3]. Примем цилиндрическую конфигурацию ротора, диаметр которого равен образующей. При такой конфигурации в соответствии с [3] наиболее оптимальной с точки зрения получения максимума КПД преобразования является 10-полюсная система возбуждения ротора, суммарная угловая зона полюсов которой составляет 240 градусов. Однако с учетом необходимости надежного крепления полюсов на магнитопроводе ротора по конструктивным соображениям может быть принята схема с максимальным числом полюсов шесть, для которой оптимальное отношение длины воздушного зазора к диаметру ротора составляет 0,06, а отношение длины магнита вдоль оси намагничивания к длине воздушного зазора в соответствии с [2] составляет  $\approx 1,4$ .

В качестве исходных данных для расчета примем схему турбогенератора воздушного охлаждения с трехфазной обмоткой. Зададимся напряжением на выходе генератора 3150 В при частоте вращения 3000 об/мин и максимальном токе обмотки статора 572 А.

Учтем, что в рассматриваемом случае напряжение генератора должно поступить на вход инвертора после того, как линейные напряжения трехфазной обмотки генератора, соединенной в звезду, будут выпрямлены. Если принять напряжение величиной 3150В, как среднее для выпрямленного по схеме "звезда Ларионова", то амплитуды линейных напряжений на обмотке генератора составят 0,606 от среднего значения выпрямленного, т.е. 1909В. Применяя для расчета базовые соотношения электромеханики и полученные ранее соотношения для оптимально построенных магнитоэлектрических систем [2, 3], получаем следующие параметры активной зоны генератора:

|   |            |
|---|------------|
| Частота вращения ротора $\omega$ , 1/с (Гц) | – 314 (50) |
| Число пар полюсов, $p$                      | – 3        |
| Полюсная дуга, град.                        | – 40       |
| Число фаз обмотки, соединенных в "звезду"   | – 3        |
| Общее число обмоток                         | – 9        |

|  |                 |
|--|-----------------|
| Активное линейное сопротивление, Ом              | – 0,03675       |
| Число витков в одной обмотке                     | – 12            |
| Среднее значение индукции в воздушном зазоре, Тл | – 0,35          |
| Сечение меди обмоточной шины, мм                 | – $8 \times 12$ |
| Наружный диаметр ротора, мм                      | – 700           |
| Внутренний диаметр ротора, мм                    | – 540           |
| Активная длина ротора, мм                        | – 700           |
| Диаметр расточки статора, мм                     | – 742           |
| Наружный диаметр шихтованного набора, мм         | – 750           |
| Объем активной зоны, м <sup>3</sup>              | – 0,15          |
| Полезная мощность генератора, кВА                | – 1800          |

Здесь приведены результаты лишь простейшего предварительного расчета, который показывает, тем не менее, перспективность дальнейшей детальной разработки предложенного направления построения генераторов малой и средней мощности. Очевидны главные достоинства магнитоэлектрических генераторов. Это надежность, компактность, высокая удельная энергоемкость. Мы не затрагиваем здесь чисто конструктивные вопросы, такие, например, как крепление постоянных магнитов на магнитопроводе ротора, обеспечение жесткого крепления проводников в расточке статора, организация охлаждения и другие технологические вопросы. Все они требуют детальной и тщательной проработки. Вполне может оказаться, например, что целесообразнее будет применить пазовую компоновку статора и расположить обмотку в пазах шихтованного набора, или применить для крепления магнитов кроме распорных клиньев дополнительно бандаж. Однако все это не повлияет в ощутимой мере на высокие удельные характеристики генератора.

Нельзя не остановиться и на некоторых особенностях магнитоэлектрической схемы построения генератора с беспазовым статором. Беспазовая схема построения электромеханического преобразователя предполагает размещение активной части обмотки непосредственно в магнитном поле ротора достаточно высокой плотности, которое пересекает проводники обмотки с частотой  $\omega p$ , в результате чего в массиве меди шины возбуждаются вихревые токи. В отличие от пазовых конструкций, где в пазы с проводниками попадает лишь некоторая часть потока рассеяния, в беспазовых конструкциях потери на вихревые токи в меди проводников становятся ощутимыми. Для оценки этого вида потерь может быть использовано полученное ранее соотношение [4],

$$P_{BM} = \frac{\pi^3 m W_{\phi} a f^2 B_m^2 d_{\text{пр}}^4 l_a}{16 \rho}$$



где:  $m$  – число фаз обмотки,  $W_\phi$  – число витков в фазе,  $a$  – число параллельных проводников в жгуте,  $f$  – частота переменного магнитного поля,  $d_{\text{пр}}$  – диаметр проводника,  $l_a$  – активная длина обмотки БМД,  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода.

В нашем случае частота переменного магнитного поля составляет 150 Гц при средней индукции в зазоре 0,35 Тл. При этих параметрах величина потерь на вихревые токи в меди провода для выбранного сечения шины оказалась равной 19,2 кВт, что составляет  $\approx 1\%$  от полезной мощности генератора. Заметим, что джоулевы потери в обмотке нашего генератора при полной нагрузке составляют примерно 36 кВт (2% от полезной мощности). Эффективным средством снижения потерь на вихревые токи в меди является расщепление провода на несколько изолированных друг от друга и соединенных на зажимах генератора параллельно проводников. Укладка такого многожильного провода, который обладает меньшей жесткостью, при беспазовой компоновке более сложная и вполне возможно, что более целесообразным будет использовать пазовую компоновку ротора.

Для окончательной оценки всех плюсов и минусов генератора с магнитным возбуждением потока должны быть рассмотрены многие важные вопросы, которые остались за рамками этого пред-

варительного исследования. Должен быть произведен расчет всех характеристик генератора при оптимизированной геометрии магнитов и магнитопровов, исследованы тепловые процессы, оценены полные потери, в том числе механические, электромагнитные и потери в преобразовательной части комплекса, определены массогабаритные показатели, разработана конструкция генератора, решены технологические и другие вопросы.

Генераторы с магнитным возбуждением потока найдут применение в системах возбуждения мощных турбогенераторов, в автономных системах энергообеспечения поповышенной надежности, эффективности и безопасности, в частности в авиации, надводном и подводном флоте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.Е., Петухов И.С. Сравнительный анализ систем возбуждения электромеханических преобразователей // Техн. электродинамика. – 2007. – № 6. – С.44–47.
2. Антонов А.Е., Киреев В.Г. Построение оптимальных магнитных систем беспазовых магнитоэлектрических двигателей // Техн. электродинамика. – 2003. – № 4. – С.38–40.
3. Антонов А.Е., Киреев В.Г. Моделирование многополюсных магнитных систем магнитоэлектрических двигателей с учетом межполюсных полей рассеяния // Техн. электродинамика. – 2008. – №4. – С.47–50.
4. Антонов А.Е., Петухов И.С. Потери на вихревые токи в обмотке беспазовой электрической машины // Техн. электродинамика. – 2010. – Техн. электродинамика. – 2010. – № 4. – С. 38–42.
5. Шрайбер Д. Преобразователи высокой мощности // Силовая электроника. – 2010. – С. 90–94.

© Антонов А.Е., 2011

