

А. В. БОЛОТОВ, К. А. БАКЕНОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

In the paper industrial prototype of electromechanical generating transducer is described for wind power plants, which operates at variable frequency of rotation. In the generator «switched rectifier» is used which carries out consistent, parallel and series-parallel switching of winding passes, to ensure electricity producing at variable frequency of rotation. In the design of the electromechanical generating transducer new approach is used to solving a problem of extending the range of operating frequencies of rotation. Tests have confirmed the accuracy of calculations and the rightness of the concept of ensuring operability in a wide range of frequencies of rotation (wind speed). The created electromechanical generating transducer may operate when changing of frequency of rotation and capacity in a wide range.

Изменение климата и растущий дефицит энергии требуют поиска и освоения возобновляемых источников энергии. Казахстан обладает высоким потенциалом ветровой энергии, что выделяет ветроэнергетику как одно из перспективных направлений. Важными шагами в развитии ветроэнергетики в республике являются ратификация Киотского протокола и принятый в 2009 году. Закон «О поддержке использования возобновляемых источников энергии».

Для успешного развития ветроэнергетики требуется вести работы по усовершенствованию конструкций ветроэлектростанций (ВЭС) и снижению себестоимости вырабатываемой ими электроэнергии. Основными узлами ветроэлектростанции являются ветродвигатель и электромеханический преобразователь (ЭМП). Электромеханический преобразователь преобразует механическую энергию, возникающую на валу ветродвигателя, в электрическую энергию. Производительность ВЭС в большей степени зависит от согласованности характеристик этих узлов. При разработке ветродвигателей нужно учитывать особенности ветра (средняя годовая скорость, наличие порывов и их амплитуда, характер розы ветров) в месте установки. Казахстанскими учеными разработана

принципиально новая конструкция ветродвигателя с вертикальной осью вращения и максимально адаптированная к ветрам Казахстана [1]. На основе анализа рабочих характеристик ветродвигателя определены требования к ЭМП:

поддержание постоянства напряжения и работоспособности при широком диапазоне изменения рабочей частоты вращения $n = f(V)$ и мощности $P = f(V^3)$;

поддержание удовлетворительного КПД во всем диапазоне изменения мощности и частоты вращения без существенного увеличения массогабаритных показателей;

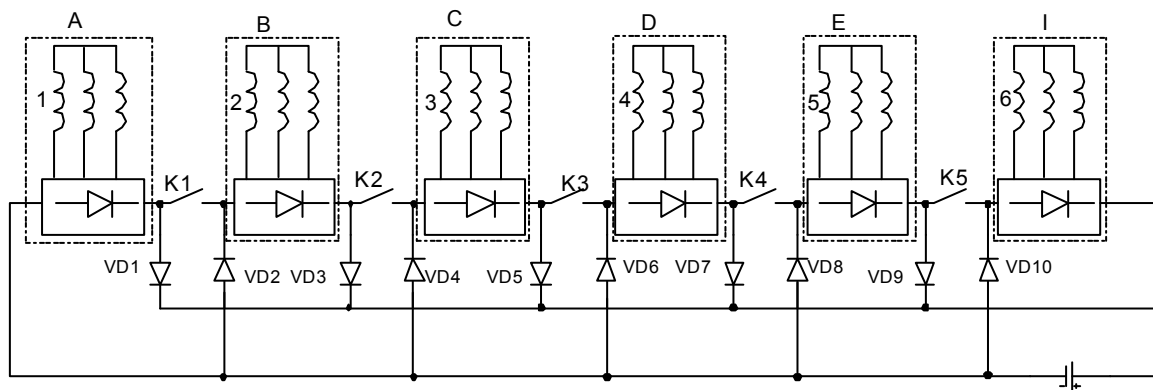
способность плавного регулирования преобразуемой энергии для обеспечения оптимального режима работы ветроэлектростанции;

электромеханический преобразователь должен иметь прямое соединение с валом ветродвигателя, без дополнительных устройств регулирования частоты вращения.

В ветроэлектроустановках широко применяются асинхронные машины, синхронные машины со звеном постоянного тока. С развитием полупроводниковой техники повысилось внимание к асинхронизированным синхронным машинам. Анализ согласованности характеристик известных типов электромеханических преобразователей с характеристиками ветродвигателя показал, что диапазоны изменения частоты вращения у них недостаточны для согласованной работы.

Авторами разработан электромеханический преобразователь (ЭМП) со специальным выпрямителем (коммутируемый выпрямитель). Якорная обмотка ЭМП (см. рис.) выполняется из $a_{\text{НОМ}}$ параллельных ветвей (1–6) (в частном случае $a_{\text{НОМ}}=6$), каждая из которых подключена к выпрямителю, образуя соответствующее количество $a_{\text{НОМ}}$ вентильных блоков А-І. Вентильные блоки подключены параллельно к общей сети постоянного тока (аккумуляторная батарея) через полупроводниковые элементы VD1-

VD10, включенные в прямом направлении, кроме внешних выводов крайних блоков, подключенных к сети непосредственно. Между положительными выходами предыдущих и отрицательными выходами последующих блоков включены коммутирующие элементы K1-K5. Выпрямители, элементы VD1-VD10 и K1-K5 образуют коммутируемый выпрямитель.



Принципиальная схема ЭМП с коммутируемым выпрямителем

Коммутирующие полупроводниковые элементы обеспечивают параллельное, смешанное (параллельно-последовательное), последовательное включение вентильных блоков к сети постоянного тока. Каждая комбинация включения соответствует определенной ступени коммутируемого выпрямителя, количество которых зависит от числа параллельных ветвей. Большое число последовательно включенных параллельных ветвей используют при меньшей частоте вращения и мощности, что позволяет поддерживать оптимальную для этого режима плотность тока в обмотках генератора. Из концепции работы ЭМП следует, что напряжение на каждом вентильном блоке со снижением частоты вращения уменьшается, в то время как выходное напряжение сохраняется постоянным.

Представленное решение применимо для использования в ЭМП с асинхронной машиной и синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов [2, 3].

В ЭМП используется синхронная машина с когтеобразными полюсами. Машины этого типа обладают преимуществами: одна обмотка на все полюса, малые массогабаритные показатели. Существующие методики расчета индуктора с когтеобразными полюсами опираются на эмпирически полученные зависимости, однако они неудобны для применения в численных расчетах.

Нами разработана математическая модель ЭМП, основанная на методе гладких и разрывных гармонических [2]. Согласно ей кривая магнитной индукции в воздушном зазоре разлагается на более простые гладкие и разрывные гармонические. Для межполюсного и полюсного участков магнитная индукция в воздушном зазоре аппроксимируется своими рядами разрывных гармонических:

$$b_{\delta} = \sum B_{\delta\rho} \cos\left(\frac{\pi}{b_n} \cdot \rho\chi\right); \quad 0 \leq \chi \leq b_n; \quad (1)$$

$$b'_{\delta} = \sum B'_{\delta\rho} \cos\left(\frac{\pi}{\tau - b_n} \cdot \rho\chi\right); \quad 0 \leq \chi \leq \tau - b_n, \quad (2)$$

где $B_{\delta\rho}$ – амплитуда ρ -разрывной гармонической магнитной индукции в воздушном зазоре на участке полюсного наконечника; $B'_{\delta\rho}$ – амплитуда ρ -разрывной гармонической нормальной (к поверхности расточки статора) составляющей индукции на межполюсном пространстве; τ – полюсное деление; b_n – ширина полюсного наконечника, приведенная к расточке статора; $\rho=0,1,\dots,K$ – порядок разрывных гармонических; K – наибольший порядок учитываемой гармонической.

Определение магнитных индукций, м.д.с. потоков рассеяния и рабочих характеристик находится путем решения совокупности систем нелинейных уравнений разрывных гармонических м.д.с., уравнений равновесия э.д.с. и

системы уравнений потоков рассеивания. Система уравнений решается итерационным способом с использованием метода Ньютона.

Уравнение равновесия ЭДС имеет вид

$$E_{\delta} - E_{\delta j}(B_{\delta(i=0)}, \dots, B_{\delta(i=K)}) = 0, \quad (3)$$

где E_{δ} – ЭДС, индуцируемая в обмотке генератора, определяемая через исходные данные (фазный ток и напряжение, активное и реактивное сопротивления рассеяния фазы и коэффициента мощности); $E_{\delta j}$ – э.д.с. машины в j -ой итерации.

Уравнения МДС разрывных гармонических м.д.с. на магнитную цепь для $\rho=0$:

$$F_{u(\rho=0)} = F_{\delta Z(\rho=0)} + F_{a(\rho=0)} + F_{am} + F_{\rho}. \quad (4)$$

Уравнения МДС разрывных гармонических м.д.с. на магнитную цепь для $\rho>0$:

$$F_{u(\rho>0)} = F_{\delta Z(\rho>0)} + F_{a(\rho>0)} + F_{n(\rho>0)}, \quad (5)$$

где F_a – МДС на ярмо якоря; F_n – МДС на полюсный наконечник; F_{am} – МДС на ярмо якоря в межполюсном пространстве; F_{ρ} – МДС на цепь индуктора.

Для определения коэффициентов рассеяния магнитного потока в цепи индуктора составляется следующая система уравнений:

$$V_{i(j-1)} - V_{i(j-1)} = 0, \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, 5$; j – порядок итерации; $V_{i(j)}$ – магнитный поток на i -м участке цепи ротора.

При расчете магнитной цепи в первом итерационном цикле корни систем нелинейных уравнений (3)–(6) прогнозируются, а в каждом последующем итерационном цикле корни нелинейных уравнений берутся из предыдущего цикла.

С использованием математической модели авторами были исследованы конструкции ЭМП с различными обмоточными данными, формами

полюсов. В результате получены рекомендации по выбору индукции в воздушном зазоре, линейной нагрузки, отношения длины сердечника статора к его диаметру. На основе этих рекомендаций разработана и выпущена партия ЭМП БНБ-20-500-16-У2-ВГВ с номинальной частотой вращения 500 об/мин и номинальной мощностью 20 кВт. Выпуск ЭМП осуществлялся на Сафоновском электромашиностроительном заводе. Вся партия ЭМП прошла приемо-сдаточные испытания. Они показали работоспособность схемных решений, достаточную точность методики расчета, адекватность математической модели и программы для проектирования ЭМП с синхронными генераторами с когтеобразными полюсами. В табл. приведены данные расчетов и испытаний регулировочных характеристики ЭМП.

Регулировочные характеристики

$n_{ген}, об/мин$	$I_{випн}, А$	$I_{врас}, А$	$\Delta I_{\phi}, А$	$P_{ген}, кВт$	$I_n, А$	$U_{дегсг}, В$	а, пар-х ветвей
500	3,14	3,28	0,14	20,50	83	248	6
450	2,37	2,76	0,39	14,82	60	247	6
390	2,94	2,75	0,19	12,25	49	248	6
390	3,15	3,39	0,24	12,25	49	248	3
350	2,29	2,41	0,12	7,93	32	248	3
290	1,44	1,64	0,2	3,73	15	249	3
290	1,59	1,74	0,15	3,73	15	249	2
250	1,15	1,35	0,2	2,22	9	247	2
220	1,1	1,31	0,21	1,73	7	247	2
220	1,34	1,48	0,14	1,73	7	247	1
180	0,82	0,98	0,16	0,83	3	248	1
130	0,72	0,89	0,17	0,25	1	248	1

Испытания проводились для всего рабочего диапазона частот вращения на всех четырех ступенях переключения обмотки. В табл. приводятся токи возбуждения, полученные при испытаниях $I_{в\text{исп}}$ и расчетные значения $I_{в\text{рас}}$, отклонение токов возбуждения $\Delta I_{\text{в}}$, мощность $P_{\text{ген}}$ и частота вращения $n_{\text{ген}}$, ток нагрузки $I_{\text{н}}$ и выпрямленное напряжение $U_{\text{дсгсг}}$. Степень коммутируемого выпрямителя указывается количеством параллельных вентильных блоков «а». На первой ступени шесть вентильных блоков включены параллельно, вырабатываемая мощность максимальна.

Основные выводы и результаты работы сводятся к следующему:

1. Разработаны принципиально новые ЭМП с широким диапазоном изменения частоты вращения и мощности, при этом обеспечивается поддержание постоянства выходного напряжения и высокого коэффициента полезного действия во всем диапазоне изменения частоты вращения.

2. Предложенные схемные решения применимы в синхронных генераторах как с электромагнитным возбуждением, так и с возбуждением от постоянных магнитов и ЭМП с использованием асинхронных генераторов.

3. Разработана методика расчета синхронного генератора с когтеобразными полюсами для численного метода расчета электромеханической части преобразователя. На основе исследований получены рекомендации по выбору главных размеров электромеханической части преобразователя.

4. Заводские испытания ЭМП с коммутируемым выпрямителем и когтеобразными полюсами подтвердили адекватность и удовлетворительную точность математической модели, работоспособность разработанных схемных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болотов А.В., Уткин Л.А., Бакенов К.А., Болотов С.А.* Электроснабжение удаленных объектов с использованием автономных источников энергии. (Международный опыт и перспективы РК) // Энергетика, телекоммуникация и высшее образование в современных условиях: Труды 3-й Международной научно-технической конференции. Алматы, 2002. С. 28-31.
2. *Новокишенов В.С., Болотов С.А., Бакенов К.А.* Бесконтактные генераторы для ВЭС малой мощности // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Труды 5-й Международной научно-технической конференции. Алматы, 2006. С. 142-144.
3. *Болотов А.В., Новокишенов В.С., Шназбаев Е.* Асинхронный вентильный генератор для ВЭС // Энергетика, радиотехника, электроника и связь: Сборник научных трудов. Алматы, 2002. С. 8-10.

Файл: 6168Болотов_Бакенов.doc
Каталог: X:\Полные журналы PDF\Вестник НИА РК\2009_№4
Шаблон: C:\Documents and Settings\Санду\Application
Data\Microsoft\Шаблоны\Normal.dotm
Заголовок: УДК 621
Содержание:
Автор: кайрат
Ключевые слова:
Заметки:
Дата создания: 05.11.2009 11:02:00
Число сохранений: 7
Дата сохранения: 05.11.2009 11:13:00
Сохранил: а
Полное время правки: 11 мин.
Дата печати: 07.12.2012 16:28:00
При последней печати
страниц: 8
слов: 1 749 (прибл.)
знаков: 9 975 (прибл.)