СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАШИНОВЕНТИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

АВТОР:

Ю.Г. ШАКАРЯН,
Д.Т.Н.,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

В статье обсуждаются вопросы применения электромашиновентильных комплексов (ЭМВК), состоящих из электрических машин переменного тока и вентильных преобразователей частоты в энергетике при использовании как традиционных, так и нетрадиционных источников энергии. Показано, что ЭМВК способны повысить экономичность, надежность и устойчивость работы электроэнергетических систем, улучшить маневренные характеристики оборудования. Вместе с тем создание и применение ЭМВК требует развития современной базы силовой электроники и преобразователей частоты на их основе.

Ключевые слова: электромашиновентильные комплексы; электрические машины переменного тока; вентильные преобразователи частоты; устойчивость работы электроэнергетических систем.

Журнал «Известия Академии наук. Энергетика» — один из самых уважаемых научно-технических журналов нашей страны

Статья публикуется с любезного разрешения редакции «Известия РАН. Энергетика»

ВВЕДЕНИЕ

Трудами многих поколений специалистов созданы высокоэффективные системы генерирования на основе синхронных машин, нашедшие широчайшее применение в энергетике при использовании как традиционных, так и нетрадиционных видов топлива, например возобновляемых источников энергии. Несмотря на эти действительно выдающиеся достижения, не удалось и не могло удаться коренным образом изменить свойства существующих генераторов, приблизив их в режимном отношении к свойствам генераторов постоянного тока, что в ряде случаев не позволяет обеспечить наивысшую техническую и экономическую эффективность функционирования энергоагрегата, повысить маневренные характеристики.

На рис. 1 дан перечень основных недостатков синхронных генераторов, обусловленных их свойствами.

Современные тенденции развития энергетики — вовлечение в производство электроэнергии новых источников энергии, возрастающие требования по надежности и экономичности делают задачу поиска эффективных систем генерирования все более актуальной.

Принципиальное решение проблемы видится в использовании систем генерирования на базе электромашиновентильных комплексов (ЭМВК), состоящих из электрических машин переменного тока (синхронных и асинхронных) и вентильных преобразователей частоты. Бурное

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И НЕДОСТАТКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Свойства

- Жесткая зависимость между напряжением генератора и углом нагрузки
- Ограничение угла нагрузки условиями устойчивости
- Ограничение частоты вращения ротора
  - в статике работа только с синхронной частотой;
  - в динамике допускаются изменения частоты в ограниченных пределах

Недостатки

1. Невозможность регулирования реактивной мощности в широких пределах.
2. Необходимость дополнительных капитальных затрат, связанных с установкой компенсирующего оборудования, превышающего минимально необходимый объем.
3. Противоречие между требованием поддержания напряжения и статической устойчивостью (по условиям устойчивости необходимо регулировать ЭДС (ток возбуждения) в функции изменения напряжения).
4. Ограничения по статической устойчивости, особенно сказывающиеся в послеаварийных режимах при наличии высоковольтных кабельных и воздушных линий.
5. Не всегда обеспечивается динамическая устойчивость, т.е. восстановление режима после аварий в энергосистеме.
6. Проблемы при возникновении асинхронного хода в энергосистемах.
7. Проблемы при точной синхронизации, снижение надежности генераторов при грубой синхронизации.
8. Невозможность работы генераторов в установлении режима с несинхронной скоростью, например тогда, когда это способствует повышению КПД агрегата в целом.

Рис. 1

развитие силовой энергетики, создание (пока только за рубежом) высокоинтегрированных и надежных преобразователей частоты большой мощности с микропроцессорным управлением делают осуществление этой задачи в настоящее время достаточно реальным.

В статье обсуждаются возможные аспекты применения ЭМВК в энергетике и рассматриваются некоторые схемные решения по реализации этих комплексов. Учитывая определенную новизну излагаемого материала, автор был бы крайне признателен за критическую оценку данной работы.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭМВК

Возможные типы ЭМВК могут быть разделены принципиально на две основные группы (рис. 2), различающиеся схемой подключения машины и преобразователя частоты:

1. Преобразователь частоты в первичном (статорном) контуре генератора синхронного или асинхронного с КЗ-ротором.

2. Преобразователь частоты во вторичном (роторном) контуре асинхронного генератора с фазным ротором.

Каждый из этих вариантов имеет множество подвариантов, отличающихся друг от друга типом преобразователя частоты (со звеном и без звена постоянного тока), числом фаз обмоток статора и ротора (двух-, трех- и многофазные обмотки), наличием или отсутствием контактных колец на роторе. На некоторых основных схемах мы остановимся ниже.

Применение преобразователя частоты в составе ЭМВК позволяет придать машине (генератору) переменного тока принципиально новое качество — обеспечить независимое регулирование частоты вращения ротора (ω) и угла нагрузки машины (θ).

Как хорошо известно, в синхронном генераторе угол нагрузки жестко связан с угловым положением ротора относительно вектора напряжения сети (статора). Этот угол зависит от изменения активной и реактивной мощности машины и достигает при определенных значениях критической величины, после этого машина теряет синхронизм, а ротор начинает вращаться с частотами вращения, отличными от синхронной, что приводит к нарушению нормального установившегося режима.

В асинхронном генераторе угол нагрузки жестко связан с частотой вращения (скольжением). При скольжении $s = \omega_1 - \omega/\omega_1 = 0$ угол θ равен нулю, а при критическом скольжении этот угол достигает 135°, причем для машин большой мощности диапазон изменения скольжения от нуля до критического незначителен, а при $|s| > |s_{кр}|$, как известно, машина теряет устойчивость. В этом смысле классические синхронный и асинхронный генераторы мало чем отличаются друг от друга.

При наличии преобразователя частоты либо в первичном, либо во вторичном контуре частота вращения ротора

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \qquad (1)$$

изменяется при изменении (регулировании) либо ω_1, либо ω_2. Угол же нагрузки машины, равный (при пренебрежении активным сопротивлением статора)

$$\theta \operatorname{arctg} P_1 / \theta_1 + U^2_1 / \omega_1 L_1, \qquad (2)$$

определяется только значениями активной и реактивной мощности машины и не зависит от углового положения и частоты вращения ротора. В (2) индуктивность L_1 — полная синхронная индуктивность обмотки статора.

Благодаря независимому регулированию ω и θ появляется принципиальная возможность обеспечить работу генератора в установившихся режимах с частотами вращения, отличными от синхронной, изменять эту частоту по заданной программе независимо от частоты сети (ω_c), обеспечив еще одну «развязку» частот ω_c и ω.

В то же время независимость угла θ или векторной диаграммы машины от частоты вращения позволяет обеспечить регулирование напряжения генератора U_1 или реактивной мощности θ_1 в широких пределах[1], при этом нет опасности для нарушения устойчивости.

Иначе говоря, машина может работать в установившихся режимах при теоретически любых значениях ω устойчиво при всех значениях угла θ. Для генераторного режима это $0 < \theta < 180°$, для двигательного — $180° < \theta < 360°$, для режима идеального синхронного компенсатора (без потерь) угол θ равен 0 или 180°, что соответствует режимам выдачи или потребления реактивной мощности.

Независимое регулирование ω и θ позволяет, таким образом, достигать следующих основных целей.

1. Обеспечивается на принципиально более высоком уровне возможность решения проблем статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем.

[1] Отметим, что активная мощность определяется мощностью на валу, т. е. задается турбиной.

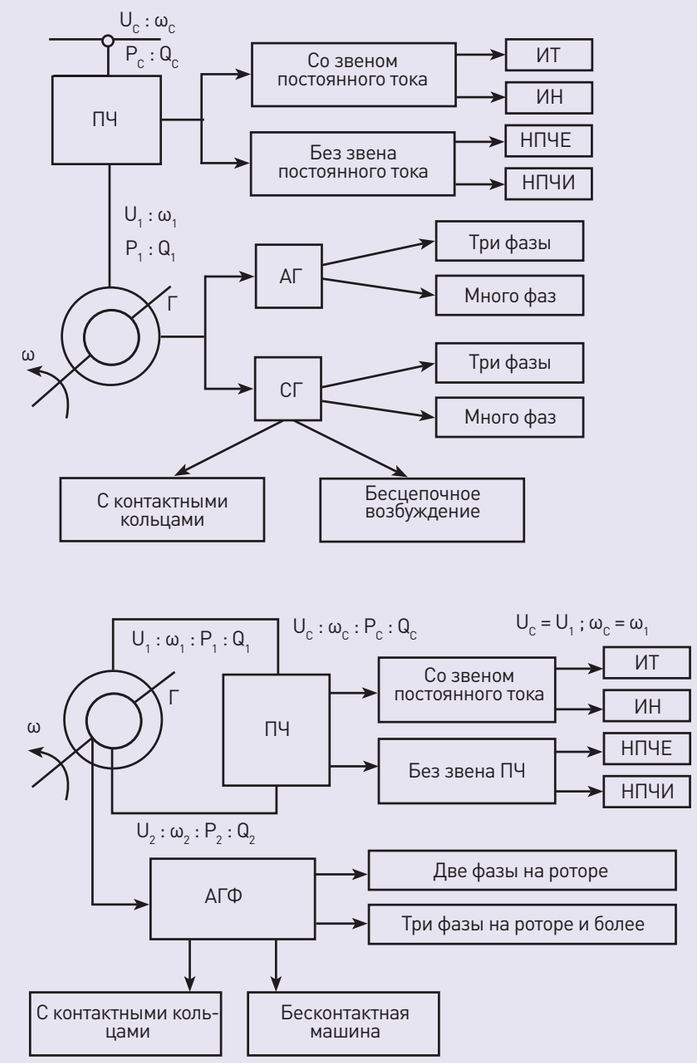
2. Представляется возможным работать в установившихся режимах с оптимальными значениями частот вращения ротора (в общем случае переменными) при изменении входных параметров турбины (например, напора воды в гидравлических турбинах, скорости ветра в ветровых турбинах) и выходных параметров генератора (нагрузки), благодаря чему в конечном счете возможно повышение экономичности работы агрегата, его КПД в целом.

3. При использовании ЭМВК могут принципиально проще решаться вопросы синхронизации агрегатов при параллельной работе между собой и с энергосистемой, а также проблемы, возникающие при асинхронных и других аномальных режимах работы энергосистемы, т. е. может быть повышена надежность работы электроэнергетической системы в целом.

4. Наконец, при применении ЭМВК могут существенно проще обеспечиваться пуски и остановы агрегатов, т. е. может быть повышена их маневренность. В качестве преобразователей частоты в ЭМВК могут использоваться и используются известные и разрабатываемые в настоящее время преобразователи частоты. Электрические машины, входящие в состав ЭМВК, как правило, специально проектируются для работы совместно с преобразователями частоты.

Параметры этих машин, токи, напряжения и число фаз обмоток оптимизируются для наиболее удачного сочетания с преобразователями частоты. Здесь имеет место аналогия с регулируемыми электроприводами переменного тока при более высоких требованиях к электрооборудованию, входящего в состав ЭМВК, в отношении надежности и экономичности и при больших в общем случае мощностях этих комплексов.

ЭЛЕКТРОМАШИНОВЕНТИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ



Обозначения: АГ — асинхронный генератор с КЗ ротора; СГ — синхронный генератор; АГФ — асинхронный генератор с фазным ротором; ПЧ — преобразователи частоты; ИТ — инвертор тока; ИН — инвертор напряжения; НПЧЕ — непосредственный преобразователь с естественной коммутацией вентилей; НПЧИ — непосредственный преобразователь с искусственной коммутацией вентилей

Рис. 2

Использование преобразователей частоты в системах генерирования сопряжено с новыми и достаточно сложными научно-техническими проблемами. Во-первых, необходимо отметить, что ЭМВК более дороги, нежели традиционные синхронные генераторы. Во-вторых, при прочих равных условиях, собственно КПД ЭМВК несколько ниже КПД традиционных синхронных генераторов [2], что обусловлено применением дополнительного (в данном случае преобразовательного) оборудования.

Необходимо также решать вопросы надежной работы этого комплекса, его совместимости с сетью, что требует применения соответствующих схемных решений, элементной базы и др. и в конечном итоге приводит к дополнительным капитальным затратам. Поэтому правильный выбор схемы ЭМВК — важнейшая научно-техническая задача, стоящая перед специалистами, занимающимися вопросами создания и практического использования ЭМВК.

В таблице для ориентировки даны общие сопоставления ЭМВК, отнесенных нами ранее к первой и второй группам (см. рис. 2), конкретный же выбор схемы ЭМВК может быть сделан на основе анализа конкретной области применения.

Опишем эти области.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭМВК

Гидроаккумулирующие электростанции, гидростанции, в том числе малые, с изменяющимся в широких пределах напорах, приливные электростанции

Все эти электростанции характеризуются тем, что напор изменяется в широких пределах, и работа с переменной частотой вращения агрегата позволяет значительно повысить КПД турбины и тем самым КПД агрегата. Иначе говоря, при применении ЭМВК возрастает выработка электроэнергии. Конкретные цифры определяются условиями работы.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ЭМВК ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ГРУПП

Наименование	ЭМВК группы 1	ЭМВК группы 2	Сопоставление
Мощность преобразователя частоты ($S_{пч}$)	$S_{пч1} \approx S_г$, где $S_г$ — мощность генератора	$S_{пч2} \approx 2\|s\|S_г$, где s — скольжение	Для скольжений $\|s\| < 0,5$ $S_{пч2} < S_{пч1}$
Коэффициент полезного действия $\eta_э$	$\eta_{э1} = \eta_{пч}\eta_г$	$\eta_{э2} = \eta_{пч} = 1/s(\eta_{Nч} - \eta_г)$	Обычно $\eta_{пч} > \eta_г$. Для скольжений $(0,3 \div 0,5) > s > 0$ $\eta_{э2} > \eta_{э1}$
Влияние преобразователя частоты на сеть $\eta_э$	Достаточно сильное. Требуются специальные схемотехнические решения	Влияние тем меньше, чем меньше диапазон регулирования частот вращения	Примерно для скольжений $0 < \|s\| < (0,2 \div 0,3)$. ЭМВК группы 2 имеют преимущество
Пусковые свойства	Обеспечивается пуск во всем диапазоне частот вращения	Пуск обеспечивается не во всем диапазоне частот вращения	ЭМВК группы 1 имеют преимущество
Устойчивость – статическая – динамическая	 Практически нет проблем Практически нет проблем	 Практически нет проблем Пределы устойчивости тем меньше, чем меньше диапазон регулирования частот вращения	 Равноценны ЭМВК группы 1 имеют преимущество

[2] Это не противоречит изложенному выше положению о том, что КПД всего агрегата возрастает при применении ЭМВК.

По данным специалистов фирм «Тошиба» и «Хитачи» (Япония) [1–3], для ГАЭС мощностью 200–400 МВт регулирования частоты вращения в пределах, не превышающих ±10 % от синхронной, достаточно для того, чтобы обеспечить увеличение выработки электроэнергии на 8–15 %.

По данным [4], с уменьшением установленной мощности агрегатов ГАЭС возрастает требуемый диапазон изменения частоты вращения агрегата. Помимо увеличения выработки, при применении ЭМВК для ГАЭС увеличивается степень срабатывания водохранилища и, следовательно, уменьшается его объем, улучшаются вибрационные характеристики оборудования при различных напорах, существенно улучшаются условия синхронизации и устойчивости.

С учетом ограниченного диапазона изменений частоты вращения в агрегатах ГАЭС представляется наиболее целесообразным применение здесь ЭМВК второй группы. Именно по этому пути пошли специалисты фирм «Тошиба» и «Хитачи», которые в настоящее время создали и внедрили агрегаты подобного типа мощностью 22 МВт (1987 г.), 95 МВт (1990 г.), 105 и 395 МВт (1993 г.).[3]

Несмотря на то что эти работы были начаты у нас существенно раньше, чем в Японии [5, 6][4], в настоящее время для гидроаккумулирующих электростанций они, к сожалению, не ведутся.

Примером эффективного использования ЭВМК второй группы для опытного генератора-двигателя Кислогубской приливной электростанции является агрегат мощностью 400 кВт, работающий с частотами вращения ±30 % от синхронной. Реальное увеличение выработки электроэнергии здесь (рис. 3) составило 12–16 % [5]. На рисунке по оси абсцисс отложен напор H в метрах.

СРАВНЕНИЕ НАПОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТА МОЩНОСТЬЮ 400 КВТ В ТУРБИННОМ РЕЖИМЕ ПРИ ω = CONST И ω = VAR

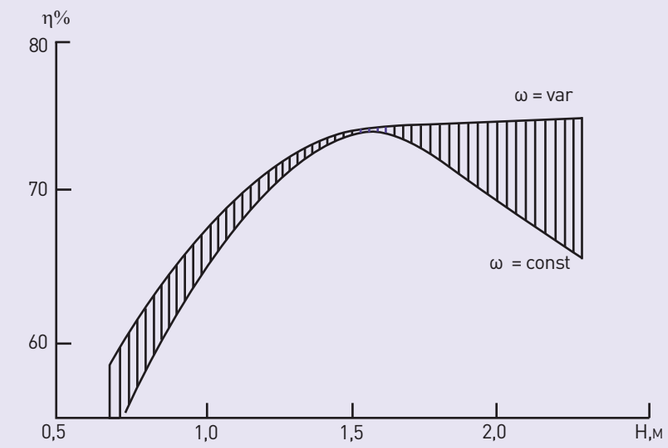


Рис. 3

Представляется более или менее очевидным, что для проектируемых в настоящее время приливных электростанций ЭМВК целесообразен, причем здесь возможно применение ЭМВК как первой, так и второй групп.

Большую перспективу имеет и применение ЭМВК для агрегатов малых ГЭС. Здесь, помимо увеличения выработки при переменных напорах, можно говорить также об упрощении и удешевлении системы за счет отказа от полного или частичного использования балластных сопротивлений, существенного упрощения систем регулирования гидротурбин, полной автоматизации электростанции. Такие работы в настоящее время начаты, здесь основным вопросом является создание высоконадежных преобразователей частоты, о чем будет сказано ниже.

Подземные хранилища газа

Здесь ситуация аналогична вышеизложенной, однако для подземных хранилищ газа напор изменяется

[3] Эти машины в отечественной литературе называют также асинхронизированными [5].

[4] В 1960–1964 гг. в СССР были разработаны и установлены на Иовской ГЭС «Колэнерго» два асинхронизированных гидрогенератора мощностью по 40 МВт с диапазоном регулирования частоты вращения ±2% от синхронной, которые успешно эксплуатировались на ГЭС более 25 лет.

в значительных пределах, что требует изменения частот вращения в пределах, превышающих отношение 2:1. Кроме того, для газовой турбины оптимальной является повышенная частота вращения 6 000–9 000 об/мин. Мощность этих агрегатов 6 000–25 000 кВт. Возможно применение только ЭМВК первой группы, которые обладают еще одним преимуществом — они повышают КПД агрегата за счет исключения мультипликатора между турбиной и генератором, роль «электрического мультипликатора» выполняет тиристорный преобразователь частоты. ЭМВК рассматриваемого типа может быть создан либо на основе асинхронной короткозамкнутой машины и специального тиристорного преобразователя частоты, либо на основе синхронной машины с бесщеточным возбуждением. В мировой практике сейчас первый способ признан более перспективным [7].

Подобного типа ЭМВК могут работать не только в генераторном, но и в двигательном режиме. В этой связи представляется полезным вновь вернуться к предложениям акад. ВА. Кириллина и К.С. Демирчяна и рассмотреть вопрос реализации высказанной ими идеи на новой основе.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОКОЛЕСА: ——— ПРИ ПОСТОЯННОЙ, — · — ·— ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ. $P/P_{ном}$ — МОЩНОСТЬ; $\omega/\omega_{ном}$ — ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ

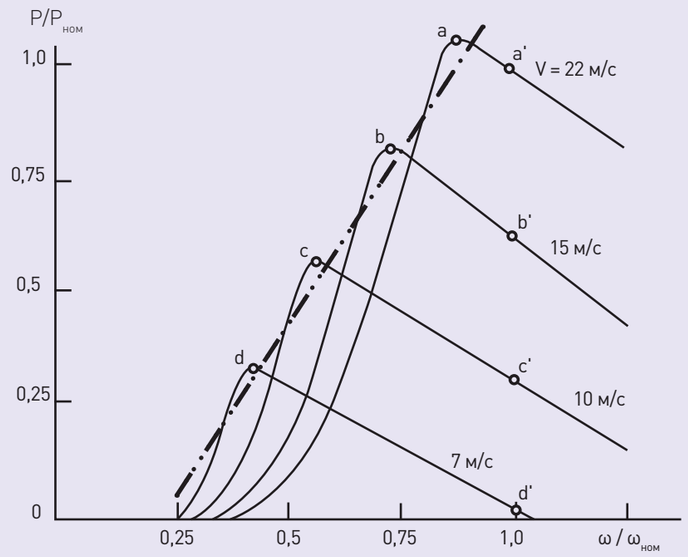


Рис. 4

Ветроэлектрические установки

Характеристика ветра как носителя энергии отмечается непостоянством, импульсами. В этих условиях применение ЭВМК в системах генерирования ветроэнергетических установок позволит решать целый комплекс задач: снизить уровень механических воздействий на элементы конструкции ветроагрегата, что приведет к уменьшению установки в целом; уменьшить или практически снять колебания мощности в электросети, обеспечивая демпфирование колебаний мощности и высокое качество генерируемой электроэнергии; упростить гидравлическую систему регулирования поворота лопастей, а иногда и вовсе отказаться от нее, что в конечном счете скажется на надежности работы ветроэлектрической установки; обеспечить параллельную работу ветроагрегатов между собой, параллельную работу ветроагрегата с сетью, обеспечить его точную синхронизацию при переменном (импульсном) характере момента на валу, обеспечить устойчивую работу ветроэлектрической установки; реализовать плавный и управляемый (с заданным ускорением) пуск ветроагрегата в двигательном режиме от сети или другого источника энергии; обеспечить защиту ветроэлектрической установки при порывах ветра в целом, ограничивая мощность вырабатываемой энергии на уровне заданной величины; повысить выработку электроэнергии ветроагрегата.

Последний тезис иллюстрирован кривыми рис. 4, на котором изображены зависимости механических характеристик ветроколеса (мощности в функции частоты вращения) при различных

скоростях ветроколеса. Из этих кривых видно, что при постоянной частоте вращения (прямая a'd') уже при скорости ветра V = 7 м/с снимаемая мощность с ветроколеса равна нулю, тогда как при переменной частоте вращения (линия ad) можно при V = 7 м/с снимать примерно 25 % номинальной мощности, а минимальная скорость ветра, при которой можно обеспечить съем мощности, снижается до ~ 3 м/с. Конкретные цифры увеличения выработки зависят от условий работы, они могут изменяться от 15 до 40 %.

В зависимости от конструкции ветроагрегата диапазон регулирования частоты вращения может быть различным — от 10–15 до 40–60 %, поэтому практически используются ЭМВК как первой, так и второй группы. Наибольших успехов здесь достигли фирмы АББ и «Сименс» [8].

Для создаваемых в настоящее время в России ветроэлектрических установок мощностью 6–30, 250 и 1000 кВт используются такие ЭМВК обеих групп. [5]

Паровые энергоблоки тепловых электростанций

Существующие паровые турбины предназначены для работы с постоянной (3000 или 3600 об/мин) частотой вращения. Использование ЭМВК в этих энергоблоках открывает перед их проектировщиками и эксплуатационниками принципиально новые возможности, требующие дополнительного исследования.

ЭМВК позволяет строго поддерживать заданную и не обязательно синхронную частоту вращения турбины при колебаниях частоты сети, к которой подключается энергоблок. Можно ЭМВК использовать и несколько иначе — дать частоте вращения определенную «свободу», например, изменять ее программно в функции нагрузки энергоблока. Возможно, что такое техническое решение позволит при глубоких разгрузках обеспечить экономию топлива. Вопросы эти требуют, как уже указывалось, всестороннего изучения — ясно то, что предоставляется возможность подходить к проблемам проектирования паровых турбин и их систем регулирования при наличии ЭМВК нетрадиционно, не «привязывать» все к синхронной частоте.

ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА И РЕСУРС РАБОТЫ ДИЗЕЛЬ-АГРЕГАТА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

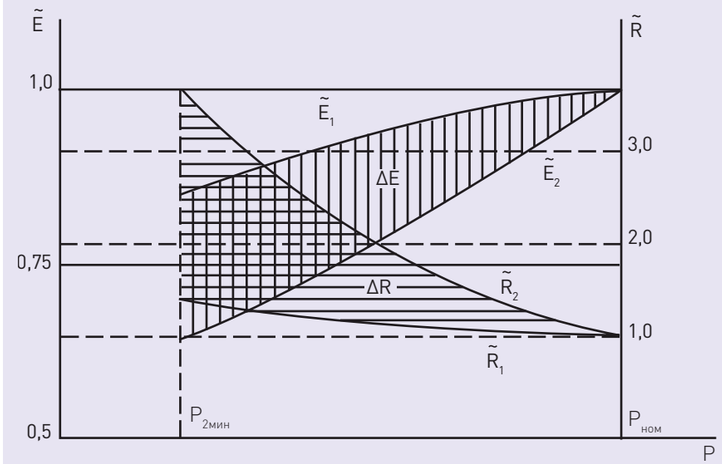


Рис. 5

С другой стороны, даже при синхронной или почти синхронной частоте вращения ротора парогенератора последний приобретает новые качества в отношении устойчивости, работы в режимах глубокого потребления реактивной мощности, если турбогенераторы выполнять на основе ЭМВК. С учетом незначительного диапазона отклонений частоты от синхронной [6] здесь наиболее целесообразным является применение машин второй группы — асинхронизированных турбогенераторов.

Определенные успехи в этом достигнуты отечественными специалистами. Так, в 1986 и 1990 гг. на Бурштынской ГРЭС Украины были введены в эксплуатацию асинхронизированные турбо-

[5] Эти работы проводит ВНИИЭ совместно с АО «Электросила», ОАО «НПО силовой электроники» (Саранск), НПО ХЭМЗ (Харьков) и другими организациями.

[6] В нормальном установившемся режиме скольжения равно нулю.

ИНФОРМАЦИЯ

АСМ — асинхронизированная синхронная машина (разновидность машины двойного питания).

Основным отличием АСМ от обычной синхронной машины является наличие двух обмоток возбуждения, расположенных вдоль и поперек оси. Поэтому ротор АСМ имеет в сущности двухфазную обмотку. В нормальном режиме ротор питается постоянным током, этот режим ничем не отличается от режима работы обычной синхронной машины. Однако в аварийных режимах, когда синхронное вращение ротора с полем статора нарушается (короткие замыкания в сети, качания ротора и пр.), обмотки возбуждения питаются переменными токами частоты скольжения, сдвинутыми по фазе на 90°, вследствие чего получается поле возбуждения, вращающееся относительно ротора.

Частота токов возбуждения регулируется автоматически и непрерывно таким образом, что поля возбуждения и якоря вращаются синхронно, благодаря чему они создают вращающий момент постоянного знака. В результате машина не выпадает из синхронизма и устойчивость ее работы повышается, что и составляет преимущество данной машины.

Преимущества: высокая устойчивость к выпадению из синхронизма

Недостатки: значительная дороговизна системы контроля и управления

генераторы мощностью 200 МВт (производство НПО «Электротяжмаш», Харьков и НПО «Уралэлектротяжмаш», Екатеринбург), которые успешно эксплуатируются по сей день, освоен серийный их выпуск [9]. В настоящее время проводится также разработка пожаробезопасных (с полностью водяным охлаждением) турбогенераторов мощностью 220– 310 МВт (АО «Электросила») и турбогенераторов с полностью воздушным охлаждением мощностью 200 МВт (НПО «Электротяжмаш»).

Газовые и парогазовые энергоблоки тепловых электростанций

Здесь перед исследователями и проектировщиками газовых турбин могут быть поставлены те же задачи, что и перед специалистами паровых турбин. Помимо этого, газовые турбины, входящие в состав многовальных газотурбинных установок (ГТУ), с единичной мощностью до 30–40 МВт, обладают малыми моментами инерции, и по этой причине проблема динамической устойчивости для них является острой [10].

Неучет этих особенностей приводит к нарушениям электроснабжения как местного, так и системного значения. Эти ГТУ имеют момент инерции в 2–3 раза меньший, чем одновальные, соответственно во столько же раз снижается предельная по динамической устойчивости длительность КЗ. С другой стороны, электростанции с ГТУ и соответствующие парогазовые установки (ПГУ) будут приближены к потребителю и во многих случаях будут работать на сети 110–220 кВ, где длительность КЗ значительно выше, чем в сетях 500–750 кВ. Применение ЭМВК может снять проблему динамической устойчивости и улучшить вообще условия функционирования подобных ГТУ и ПГУ.

Для ПГУ большой мощности (с одновальными ГТУ, имеющими существенно большие моменты инерции) применение ЭМВК в газовой или паровой части ПГУ позволит повысить режимные характеристики, маневренность. Так, на ЭМВК можно возложить регулирование реактивной мощности, не опасаясь нарушения устойчивости и сохраняя в остальных (традиционных) генераторах, входящих в состав ПГУ, более или менее постоянный режим по реактивной мощности.

Представляется, что в связи с массовым применением ПГУ в электроэнергетических системах вопрос использования в них ЭМВК заслуживает всестороннего и глубокого изучения.

Дизель-генераторные установки

Рядом исследований, выполненных в последние годы [11], было показано, что если с изменением нагрузки дизеля изменить его частоту вращения (так называемое функциональное регулирование), то это приведет к уменьшению расхода топлива (почти на 25 % при уменьшении частоты вращения почти на 40 %), уменьшению закоксованности дизеля, т. е. лучшему сгоранию топлива, возрастанию срока службы дизель-генераторной установки (ресурса) почти в 3 раза, поскольку этот срок службы обратно пропорционален квадрату частоты вращения.

На рис. 5 приведены кривые, иллюстрирующие эти характеристики [11], где:

$\tilde{E} = E/E_{ном}$;

$\tilde{R} = R/R_{ном}$, $E_{ном}$ и $R_{ном}$ — номинальные (при синхронной частоте вращения) потребления энергии (топлива) и ресурса;

$\tilde{E}_1$; $\tilde{R}_1$ при ω = 1500 об/мин;

$\tilde{E}_2$; $\tilde{R}_2$ при $1000 \leqslant \omega \leqslant 1500$ об/мин.

Здесь возможно применение ЭМВК как первой, так и второй группы. Очевидно также, что при этом удается решить еще одну достаточно острую проблему — обеспечение параллельной работы дизель-генераторных установок между собой.

Изложенные положения были подтверждены на экспериментальной установке мощностью 130 кВт в Санкт-Петербургском военно-инженерном строительном училище, однако работа эта не получила дальнейшего развития.

Думается, тут было несколько причин: возрастание стоимости собственно дизель-генераторной установки и недостаточная надежность отечественной силовой электроники. Представляется, однако, что эти трудности носят временный характер, так как с возрастанием стоимости топлива вопрос его экономии становится чрезвычайно важным. Кроме того, ЭМВК любой мощности могут найти применение только на базе надежной силовой электроники.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Совершенно очевидно, что без развития современной силовой электроники, в частности на базе GTO-транзисторов, IGBT-тиристоров и др. [12], и микропроцессорного управления невозможно говорить о сколько-нибудь широком практическом применении систем генерирования на основе ЭМВК.

Эта же современная техника нужна также для массового внедрения такого важного мероприятия энергосбережения, как регулируемый электропривод. Поэтому создание современной элементной базы в России является одной из первостепенных задач, требующих безотлагательного решения.

Вместе с тем уже сейчас появляется и возможность международного сотрудничества в области создания и применения ЭМВК с зарубежными фирмами, имеющими современную базу по силовой электронике, возможно и целесообразно создание ряда демонстрационных объектов в этой новой и перспективной области.

Анализ показывает, что на современной элементной базе уже сейчас возможно создание преобразователей части единичной мощности до 300 МВт, что может практически полностью удовлетворить современную электроэнергетику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представляется целесообразной разработка единой программы создания и применения в различных отраслях традиционной и нетрадиционной энергетики ЭМВК.

Эта программа должна содержать как разделы, относящиеся к новым процессам и технологиям, которые открывают применение ЭМВК, так и разделы, относящиеся к созданию новой элементной базы, электрических машин, преобразователей частоты и их систем управления. Автор убежден в том, что применение ЭМВК в энергетике весьма перспективно.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность К.С. Демирчяну за поддержку, помощь и ценные советы, полученные в процессе работы над данной статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Furuya S., Fujiki S., Hioki T., Yanagisawa T. Development and the world's first commissioned converterfed variable-speed generator-motor for a pumped storage power plant. 1992. CIGRE session papers 11–104. P. 9.
2. Tanako H. An 82 MW variable speed pumped-storage system. International Water Power and Dam construction 1991. № 11. P. 25–26.
3. Heyashi S., Haragushi E., Sanematsu T., Takahashi N., Yasaka Y. Development of Adyustable Speed Generator. 1988. CIGPE. Session paper 11–03. P. 6.
4. Артюх С.В. Анализ целесообразности работы агрегатов электростанций в режиме переменной частоты вращения// Энергохозяйство за рубежом. 1988. № 3. С. 30–33.
5. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Blotsky W., Botvinnik M. et al. Essais sur des machines exutees selon les deux axes, longitudunal et transversal, perspectives d'unilisation de ces machines dans les systems electrones. GIGRLE. Session 1980, P. 11005.
7. Ross Hill. High reliability Large conduction Motor Drives. Power Conference of IEEE and ASNE. Wisconsin: Milwaukee, oct, 22, 1992.
8. Голоднов Ю.М., Пиковский А.В. Генераторы для ветровых, малых гидравлических и приливных электростанций// Итоги науки и техники. Серия «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Т. 3. М.: ВИНИТИ, 1992.
9. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. Синхронные машины. М.: Высш. шк.
10. Hoon W., Chow M. Transient Stabllity Analysis for Sohio Prudhoe Bay Emergency Power System IEEE. 1986. Vol. 22. N 3. P. 430–434.
11. Путятинский В.А., Орлов А.В., Дружинин П.В. Оптимальное регулирование частоты вращения дизель-электрической установки с асинхронным генератором в зависимости от нагрузки//Двигателестроение. 1981. № 7. С. 10–12.
12. Грехов И.В. Полупроводниковые приборы сильноточной электроники//Изв. РАН. Энергетика. 1992. № l. С. 60–74.