

УДК 621.313.32

## ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

МУСТАФАЕВ Р.И., АБДУЛКАДЫРОВ А.И. \*

*Азербайджанский научно-исследовательский институт  
Энергетика и Энергетического проектирования.  
\* Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия.*

Анализируются преимущества применения синхронизированного асинхронного генератора в ветроэнергетической установке, заключающиеся в демпфировании колебаний мощности, вызываемых порывами и изменением скорости ветра. Рассматриваются некоторые свойства синхронизированного асинхронного генератора, возбуждаемого по принципиально новой схеме.

Синхронизированная асинхронная машина, интерес к которой в последнее время все более возрастает, представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, в две или три фазы которого подается постоянный ток. Такие машины в настоящее время находят применение в качестве двигателей. Они сочетают в себе достоинства асинхронного двигателя с фазным ротором (хорошие пусковые свойства) и синхронного двигателя (высокий к.п.д. и возможность регулирования реактивной мощности). Синхронизированные асинхронные двигатели (САД) большой мощности, благодаря указанным достоинствам, используются известными электротехническими фирмами, и имеется тенденция к более широкому их применению [1]. Фирма "Mitsubishi" (Япония) продолжает дальнейшие исследования в области САД большой мощности (3000 кВт и более). Они используются в приводах с тяжелыми условиями пуска, в качестве разгонных двигателей для крупных агрегатов ГАЭС и т.д.

Имеются предложения по применению САД в приводах буровых лебедок, в двухдвигательных приводах и механизмах, требующих регулирования углового положения ротора [2,3]. В последних двух работах использован отличный от известных решений подход, при котором фазные обмотки ротора САД питаются постоянным током по специальному алгоритму, что позволяет получить свойства синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением, имеющей по сравнению с машиной обычной конструкции значительно улучшенные характеристики [4,5]. Это касается демпфирования колебаний и повышения устойчивости работы при резкопеременной нагрузке, а также возможности регулирования фазы магнитного поля возбуждения.

Указанные положительные свойства синхронизированной асинхронной машины наилучшим образом отвечают условиям работы генератора ветроэнергетической установки (ВЭУ), характеризуемой резкими и практически непрерывными изменениями вращающего момента на валу генератора.

Как известно, в ВЭУ используются асинхронные генераторы (АГ), синхронные генераторы (СГ), а также асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ). Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Из указанных машин наиболее полно требованиям режимов работы ВЭУ отвечают АСГ, хотя по числу применений он занимает последнее место.

Для ответа на вопрос о возможности (или предпочтительности) применения синхронизированного асинхронного генератора (САГ) в ВЭУ обратимся к некоторым аспектам ее работы.

Резкопеременный характер и большой диапазон изменения скорости ветра являются причинами того, что основным элементом ВЭУ является система регулирования мощности. Существуют два принципиально разных способа регулирования. Первый – это регулирование мощности путем изменения угла установки лопастей – так называемый “pitch- регулирование”. Для этого используются гидравлическая и механическая системы поворота лопастей, существенно усложняющие установку.

Второй способ – это, когда лопастям по всей длине придают специальной профиль, который выбирается так, чтобы при скорости ветра выше расчетной мощность была бы почти одинаковой и равной номинальной. Это так называемое “stall-регулирование”. Система управления такими ветротурбинами значительно упрощается.

Наилучший к.п.д. ветроколесо имеет при малом угле установки лопастей и оптимальной частоте вращения. Режим с малым углом особенно необходим при часто имеющих место небольших скоростях ветра, соответствующих неполной нагрузке, так как при этом значительно увеличивается энергоотдача. Все это требует от генератора способности работать с изменяющейся частотой вращения.

При преобразовании энергии ветра имеют место резкие колебания ветровых потоков, что усложняет получение постоянной частоты. При использовании АСГ все указанные задачи решаются. При этом, в отличие от АГ, он в состоянии решить также проблему реактивной мощности.

При применении СГ энергия порывов ветра полностью передается в электрическую сеть, существенно увеличиваются механические нагрузки, колебания не сглаживаются.

Для демпфирования колебаний в ВЭУ с СГ в [6] было предложено использовать “pitch-регулирование” как при больших, так и малых скоростях ветра. Этот способ нельзя признать удачным, так как, во-первых, увеличение угла наклона лопастей при малых скоростях ветра ведет к уменьшению к.п.д., а во-вторых, достигнутая степень демпфирования является недостаточной.

С этой же целью в [7] было впервые предложено использовать в ВЭУ синхронный генератор с продольно-поперечным возбуждением. В СГ стандартной конструкции дополнительную поперечную обмотку возбуждения можно разместить вместо демпферной обмотки. Такая обмотка хорошо справляется с демпфированием свободных колебаний, возникающих, например, при резкопеременной нагрузке, при которой она обтекается током в течение времени, не превышающем 10-20 % от периода изменения нагрузки.

Кратковременно такая обмотка в состоянии создавать м.д.с., сравнимую с м.д.с. основной обмотки возбуждения. Однако длительное включение этой обмотки по условиям термической устойчивости уменьшает величину м.д.с. до 20% , а с учетом формы тока максимум до 30% от м.д.с. основной обмотки. Приближенные расчеты показывают, что поворот вектора магнитного потока возбуждения при этом составляет не более 10 эл.град. Для изменения фазы поля по и против вращения ротора система возбуждения для этой обмотки должна быть реверсивной. Необходимый же диапазон изменения фазы поля возбуждения синхронного генератора для ВЭУ довольно велик и составляет ориентировочно до  $\pm 30$  эл. град.

Таким образом, эффективность применения СГ с продольно-поперечным возбуждением, выполненном на базе СГ стандартной конструкции, в ВЭУ следует признать не вполне достаточной, хотя идея использования такого генератора, а также подходы к решению задачи являются интересными и заслуживают внимания.

Таким образом, резюмируя вышесказанное, отметим, что наиболее простым вариантом является применение АГ в сочетании с “stall-регулируемым”. При этом АГ часто выполняют с полюсно-переключаемой обмоткой якоря. Наиболее сложным и дорогим является вариант с АСГ. Вариант с СГ занимает промежуточное положение.

Применение САГ позволит решать ряд задач, которые не под силу СГ. Возможность регулирования фазы поля возбуждения в широких пределах (как будет показано ниже, этот диапазон составляет  $\pm 30$  эл. град) в САГ даст возможность почти полностью демпфировать колебания, вызываемые резкопеременным характером изменения скорости ветра. В схеме с САГ путем отключения обмотки возбуждения (ротора) от возбудителя (системы питания) и замыкания ее на сопротивление (или накоротко) мы можем перевести машину в режим асинхронного генератора. Последнее обстоятельство расширяет возможности применения САГ в ВЭУ.

Здесь мы привели лишь предварительные доводы по вопросу применения синхронизированного асинхронного генератора в ВЭУ.

Ориентировочно намечаемая принципиальная схема синхронизированного асинхронного генератора в ВЭУ представлена на рис.1, где 1,2,5,6,7- выключатели; 3- генератор; 8,9-система возбуждения генератора.

Ниже анализируется работа системы возбуждения САГ, включающей по рис.2 тиристорный преобразователь 3 с отдельно регулируемыми группами тиристоров 1 и 2 и системами управления ими 4 и 5 соответственно, согласующий трансформатор с вторичной обмоткой 6 и фазные обмотки ротора А,В,С.

Рис.1 Принципиальная схема синхронизированного асинхронного генератора ВЭУ.

Рис.2. Система возбуждения синхронизированного асинхронного генератора

Токи в фазах определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= (2U_{d_1} + U_{d_2}) / 3R, \\ I_B &= (U_{d_1} - U_{d_2}) / 3R, \\ I_C &= (U_{d_1} + 2U_{d_2}) / 3R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R - активное сопротивление фазной обмотки.

Направим продольную ось  $d$  по оси фазы А, а поперечную ось  $q$ -опережающей ее, и спроектируем фазные токи на эти оси. В результате получим составляющие токи по этим осям, которые мы назовем соответственно продольным ( $I_{fd}$ ) и поперечным ( $I_{fq}$ ) токами возбуждения

$$\left. \begin{aligned} I_{fd} &= I_A + \frac{1}{2}I_B + \frac{1}{2}I_C, \\ I_{fq} &= \frac{\sqrt{3}}{2}I_C - \frac{\sqrt{3}}{2}I_B, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

С учетом формул (1) получим

$$\left. \begin{aligned} I_{fd} &= (2U_{d1} + U_{d2}) / 2R, \\ I_{fq} &= \sqrt{3}U_{d2} / 2R \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Отсюда видно, что ток  $I_{fq}$  зависит только от  $U_{d2}$  и его можно регулировать совершенно независимо за счет изменения угла управления  $\alpha_2$  группы тиристоров 2. Однако, с другой стороны, это приводит к изменению тока  $I_{fd}$ . Существует довольно простой способ сохранения этого тока неизменным. Он заключается в поддержании тока  $I_A$  постоянным, что становится очевидным, если сопоставить первые уравнения систем (1) и (3).

Практически это легко реализовать путем стабилизации тока  $I_A$  за счет воздействия на  $U_{d1}$ .

Фазу магнитного поля возбуждения, если ее отсчитывать от оси  $d$ , можно определить по выражению

$$\alpha = \arctg(I_{fq} / I_{fd}) = \arctg[\sqrt{3} U_{d2} / (2 U_{d1} + U_{d2})]. \quad (4)$$

Поскольку в данном случае  $I_{fd} = \text{const}$ , то фаза поля возбуждения однозначно будет определяться током  $I_{fq}$  или же углом управления  $\alpha_2$ .

Результаты расчета характерных для данной системы величин приведены в таблице, где постоянный ток в фазе, равный номинальному току ротора, принят за базисное значение в относительных единицах (о.е.).

Приведенные аргументы, в том числе и табличные данные, убедительно показывают, что предлагаемый принцип синхронизации асинхронного генератора позволяет получить синхронный генератор с продольно-поперечным возбуждением, а диапазон изменения фазы магнитного поля возбуждения составляет  $\pm 30$  эл. град.

Таблица

$I_A$ , о.е.	$I_B$ , о.е.	$I_C$ , о.е.	$I_{fd}$ , о.е.	$I_{fq}$ , о.е.	$U_{d1}$ , о.е.	$U_{d2}$ , о.е.	$\alpha$ , град.
1	0	1	1,5	$\sqrt{3}/2$	1	1	30
1	0,25	0,75	1,5	$\sqrt{3}/4$	1,25	0,5	15
1	0,50	0,50	1,5	0	1,50	0	0
1	0,75	0,25	1,5	$-\sqrt{3}/4$	1,75	-0,5	-15
1	1	0	1,5	$-\sqrt{3}/2$	2	-1	-30

## ВЫВОДЫ

1. Проведена предварительная оценка преимуществ применения синхронизированного асинхронного генератора в ветроэнергетической установке.
2. Синхронизированный асинхронный генератор значительно превосходит синхронный генератор по степени демпфирования колебаний.

3. Синхронизированный асинхронный генератор в предлагаемой схеме может быть использован в качестве как синхронного, так и асинхронного генератора.

- 
1. *Shinryo J.* "Induction Synchronous Motor. // Mitsubishi denki giho. -1984. -V. 38.-No 6.-P. 24-28.
  2. *Абдулкадыров А.И.* Новый принцип синхронизации асинхронного двигателя. // Электротехника (РФ),-1998. - № 4. - с. 17-20
  3. *Абдулкадыров А.И.* О применении синхронизованного асинхронного двигателя для привода буровой лебедки. // Азербайджанское нефтяное хозяйство1997- № 7. - с. 28-30.
  4. *Абдулкадыров А.И.* Пути создания и области применения машин с продольно-поперечным возбуждением. // Нефть и газ-1997- № 3-4 (Изв. высш. учебн. заведений),с.91-94.
  5. *Абдулкадыров А.И.* Проблема демпфирования колебаний синхронных машин при резкопеременной нагрузке и пути ее решения. // Ученые записки АГНА-1997- № 1, с. 59-64.
  6. *Wasynczuk O., Man D.I., Sullivan D.P.* Dinamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators Durina Random Wind Fluctuations. // IEEE Trans. - 1981-Vol. PAS-100, No6. - P. 2837-2845.
  7. *Мустафаев Р.И.* Динамические режимы электромеханических преобразователей ВЭУ, работающих на электрическую сеть. Дисс. д-ра техн. наук. Москва: Московский энергетический институт, 1989.

## **SİNXRONLAŞDIRILMIŞ ASİNXRON GENERATORUN KÜLƏK ENERJİSİ QURĞULARINDA TƏTBİQİ**

**MUSTAFAYEV R.İ., ABDULKADIROV A.İ.**

Sinxronlaşdırılmış asinxron generatorun külək enerji qurğularında tətbiqinin üstünlükləri analiz edilir. Bu üstünlüklər küləyin sürətinin və istiqamətinin dəyişməsi ilə əlaqədar əmələ gələn rəqsləri söndürməkdən ibarətdir. Burada prinsipcə yeni sxemlə təsirləndirilən sinxronlaşdırılmış asinxron generatorun bəzi məsələlərinə baxılır.

## **THE APPLICATION OF SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS GENERATOR IN WIND-ENERGETIC SET**

**MUSTAFAYEV R.I., ABDULKADIROV A.I.**

The advantages of the application of synchronized asynchronous generator wind-energetic set are analyzed. These advantages include practically complete damping of power oscillation, caused by blast and changing of wind speed and direction. The characteristics of the synchronized asynchronous generator, driven by a fundamental new circuit are considered.