

УДК 621.313.325

## ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФАЗЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

*Абдулкадыров А.И., д.т.н., проф., Алиев Н.А., к.т.н., доц., Османов С.Дж., к.т.н., доц. Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*  
*Гаджибалаев Н.М., инж.*  
*Сумгаитский Государственный Университет*  
*Az1010, Азербайджан, г. Баку, пр-т Азадлыг, 20*  
*E-mail: soni\_76@mail.ru*

В статті розглянуто основи теорії регулювання фази магнітного поля збудження синхронних машин. Визначені можливості синхронних машин з поздовжньо-поперечним збудженням різних конструкцій за діапазоном регулювання фази магнітного поля.

**Ключові слова:** синхронна машина, магнітне поле, збудження, фаза.

In the clause the new principle of synchronization of the asynchronous engine is considered, allowing to receive the synchronous engine with longitudinal cross-section excitation. The expediency of his application in drives of chisel mechanisms is shown.

**Key words:** synchronous engine, magnetic field, excitation, phase.

**Введение.** Существуют электромеханические системы, в которых по технологическим и (или) экономическим соображениям требуется регулировать пространственное положение валов. Типичным представителем таких систем является синхронный двухдвигательный привод (буровые лебедки, мельницы и др.). В этом приводе по различным причинам валы двигателей занимают различное пространственное положение, вследствие чего имеет место неравномерное деление нагрузки между двигателями [1]. Это приводит к быстрому износу двигателей и редукторов, а нередко и к их поломке.

**Анализ предыдущих исследований.** Как показано в ряде работ, в частности [1-3], данную проблему можно решить путем регулирования токов возбуждения двигателей, а более эффективно за счет применения в этом приводе синхронных двигателей с продольно-поперечным возбуждением. При подаче тока в поперечную обмотку возбуждения каждого двигателя происходит поворот векторов их магнитных потоков возбуждения, вследствие чего нагрузки двигателей выравниваются.

**Цель работы** – разработка теории регулирования фазы магнитного поля возбуждения синхронной машины для выравнивания нагрузки в двухдвигательном электроприводе на базе синхронных машин.

**Материал и результаты исследования.** Из векторной диаграммы синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением имеем следующее соотношение [2]:

$$\theta = \delta + \alpha, \quad (1)$$

где  $\theta$  - угол между векторами э.д.с.  $\mathcal{E}_0$  и напряжения  $\mathcal{E}$  якоря, называемый углом нагрузки;  $\delta$  - угол между векторами э.д.с.  $\mathcal{E}_{0d}$  и напряжения  $\mathcal{E}$  (определяет положение ротора);  $\alpha$  - угол между векто-

рами э.д.с.  $\mathcal{E}_{0d}$  и  $\mathcal{E}_0$ , именуемый далее фазой магнитного поля возбуждения.

Фаза магнитного поля возбуждения определяется по выражению:

$$\alpha = \arctg(\mathcal{E}_{0q} / \mathcal{E}_{0d}). \quad (2)$$

Здесь  $\mathcal{E}_{0q}$  и  $\mathcal{E}_{0d}$  – э.д.с., наведенная в обмотке якоря токами возбуждения  $I_{fq}$  и  $I_{fd}$  поперечной и продольной обмоток соответственно;  $\mathcal{E}_0$  – результирующая э.д.с., причём:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{0q} &= -jx_{aq} I_{fq}; \\ \mathcal{E}_{0d} &= -jx_{ad} I_{fd}; \\ \mathcal{E}_0 &= \mathcal{E}_{0q} + \mathcal{E}_{0d}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для неявнополюсной машины, у которой  $x_{ad}=x_{aq}$ , угол  $\alpha$  можно определить по соотношению токов:

$$\alpha = \arctg(I_{fq} / I_{fd}). \quad (4)$$

Из выражений (1) – (4) видно, что, изменяя соотношение между токами возбуждения  $I_{fq}$  и  $I_{fd}$  при постоянной нагрузке ( $\theta=\text{const}$ ), можно получить различные положения ротора (различные значения угла  $\delta$ ).

Запишем уравнение (1) в отклонениях:

$$\Delta\theta = \Delta\delta + \Delta\alpha. \quad (5)$$

При  $\theta=\text{const}$  ( $\Delta\theta=0$ ) получим:

$$\Delta\delta = -\Delta\alpha. \quad (6)$$

Последнее выражение показывает, что изменение углов  $\delta$  и  $\alpha$  происходит в противоположных направлениях. Таким образом, в синхронной машине с продольно-поперечным возбуждением возможно плавное изменение, т.е. регулирование углового положения ротора.

Вернемся к вопросу о выравнивании нагрузок двигателей в двухдвигательном приводе. Угловые положения осей роторов двигателей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  различны – они совершают периодические колебания, причём, и это следует отметить, в противофазе [1].

В случае применения стандартных двигателей  $\delta_1=\theta_1$  и  $\delta_2=\theta_2$  и, поскольку  $\delta_1\neq\delta_2$ , то  $\theta_1\neq\theta_2$  и, как следствие, мощности различны  $P_1\neq P_2$ . Путем регулирования токов возбуждения двигателей их моментно-угловые характеристики изменяются, что ведет к выравниванию нагрузок. Однако это не всегда достигается, и в связи с этим, требования к точности изготовления колес редуктора ужесточаются. Кроме того, диапазон регулирования токов возбуждения получается большим, что связано с нежелательными колебаниями реактивных мощностей двигателей. В случае применения синхронных двигателей с продольно-поперечным возбуждением процесс выравнивания выглядит следующим образом. Здесь  $\theta_1=\delta_1+\alpha_1$  и  $\theta_2=\delta_2+\alpha_2$ . Для достижения равенства  $P_1=P_2$  необходимо выполнить условие  $\theta_1=\theta_2$ , т.е.:

$$\delta_1+\alpha_1=\delta_2+\alpha_2.$$

Поскольку в приводе  $\delta_1\neq\delta_2$ , то различными получаются требуемые для выравнивания нагрузок фазы магнитных полей возбуждения спаренных двигателей  $\delta_1\neq\delta_2$ . При этом, если  $\delta_1>\delta_2$ , то  $\alpha_1<\alpha_2$  и наоборот.

Следует отметить, что для практической реализации этих принципов нет необходимости в измерении углов  $\theta$  и  $\delta$ . Как показано в [1], для этого можно пользоваться косвенными параметрами. Наилучшим из них является активная составляющая тока статора.

Главное преимущество применения синхронных двигателей с продольно-поперечным возбуждением в сдвоенном приводе заключается в возможности значительного снижения требований к точности изготовления зубчатых колес редукторов, что ведет к существенному уменьшению расходов на их изготовление и, следовательно, к более широкому применению двухдвигательных приводов.

Для сравнения синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением различных конструкций, по диапазону регулирования фаз магнитного поля возбуждения, определим вначале для конкретных объектов максимально необходимую величину этого диапазона.

В синхронном двухдвигательном приводе неравномерность загрузки двигателей составляет  $\pm(20-30)\%$ , что соответствует колебаниям угла нагрузки каждого двигателя в диапазоне 20-40 эл. град. при номинальной величине этого угла, равной 30 эл. град. С учетом возможности значительного смягчения требований к точности изготовления зубчатой передачи в этом приводе, требуемый диапазон регулирования фазы магнитного поля возбуждения может быть принят равным  $\pm 30$  эл.град.

Рассмотрим другой объект, где было предложено использовать синхронный генератор с продольно-поперечным возбуждением - ветроэнергетическую установку (ВЭУ). Резкопеременный характер и большой диапазон изменения скорости ветра и его направления приводят к тому, что при применении синхронного генератора энергия колебаний скорости ветра полностью передается в электрическую сеть, существенно увеличиваются также механические нагрузки. Для эффективного демпфирования колебаний в ВЭУ необходимый диапазон регули-

рования фазы магнитного поля возбуждения синхронного генератора по предварительным оценкам составляет  $\pm 30$  эл.град.

Можно предположить, что диапазон регулирования фазы магнитного поля, равный  $\pm 30$  эл.град., является предельно необходимым в электромеханических системах, в которых целесообразно такое регулирование.

В настоящее время различают две конструктивные разновидности синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением: а) машина с одинаковыми (или почти одинаковыми) по мощности обмотками возбуждения; б) машины со значительно отличающимися по мощности обмотками возбуждения [2]. Машины первого типа имеют неявнополусный, а машины второго типа - как неявнополусный, так и явнополусный ротор. В последнем варианте поперечная обмотка возбуждения размещается в пазах полюсных наконечников ротора вместо пусковой (демпферной) обмотки и ее намагничивающая сила не превышает 20-30 % от намагничивающей силы продольной обмотки возбуждения. Возможности такой машины по диапазону регулирования угла поворота магнитного поля возбуждения весьма ограничены (речь идет о регулировании угла поворота поля в установившихся режимах).

Покажем это. В рассматриваемой машине определение угла поворота вектора магнитного потока возбуждения по формуле (4) связано с определенными трудностями. Для экспертной оценки можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{X_{aq} F_{fq}}{X_{ad} F_{fd}} \right], \quad (7)$$

где  $F_{fq}$  и  $F_{fd}$  - м.д.с. соответствующих обмоток возбуждения - поперечной и продольной. Если принять, что в явнополусных машинах обычно  $X_{ad}/X_{aq}=1,5$ , то при величине  $F_{fq}=(0,2-0,3)F_{fd}$  имеем  $\alpha=7,5-10$  эл. град. Отметим также, что при указанной величине  $F_{fq}$  построение векторной диаграммы синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением не имеет практического смысла. Действительно, величина результирующей э.д.с. (без учета формы магнитного поля, создаваемого поперечной обмоткой, и насыщения магнитной цепи):

$$E_0 = \sqrt{E_{0d}^2 + E_{0q}^2} \approx \sqrt{1^2 + (0,3/1,5)^2} = 1,02,$$

т.е.  $E_0 \approx E_{0d}$  с большей точностью, чем точность построения векторной диаграммы.

Из-за сравнительно малой величины угла  $\alpha$  применение явнополусной синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением в вышеуказанных установках не рекомендуется и в дальнейшем она не рассматривается.

Синхронные машины с продольно-поперечным возбуждением по первому пункту могут быть реализованы по двум схемам. Первая схема - это машина с неявнополусным ротором с равномерным размещением пазов по всей окружности без больших зубьев. Обмотки выполняются одинаковыми и занимают одинаковое число пазов. Такую машину назовем машиной с симметричными обмотками возбуждения.

Вторая схема реализуется на базе стандартной асинхронной машины с фазным ротором, фазные обмотки которого питаются постоянным током по специальному алгоритму [3]. Такая машина названа синхронизированной асинхронной машиной. Рассмотрим эти варианты в отдельности.

В машине с симметричными обмотками возбуждения возможности поворота магнитного поля ротора теоретически не ограничены ( $\pm 360$  эл. град.), что достигается за счет регулирования и реверсирования токов в обеих обмотках возбуждения.

При повороте магнитного поля возбуждения одновременно требуется выполнить следующее условие:

$$E_0 = \sqrt{E_{0d}^2 + E_{0q}^2} = \text{const} . \quad (8)$$

Для этого достаточно использовать законы регулирования э.д.с. по выражениям:

$$E_{0d} = E_0 \cos \alpha; E_{0q} = E_0 \sin \alpha . \quad (9)$$

Напомним, что здесь  $F_{0d}$ ,  $F_{0q}$  – это не проекции результирующей э.д.с.  $E_0$  на оси  $d$  и  $q$  соответственно, а э.д.с. наведенные токами возбуждения  $I_{fd}$  и  $I_{fq}$  по формулам (3), причем  $E_{0d}$  располагается на оси  $q$ ,  $E_{0f}$  на оси  $d$ .

Для неявнополюсной машины в алгоритмах (8) и (9) от э.д.с. можно перейти к токам, т.е.:

$$I_f = \sqrt{I_{fd}^2 + I_{fq}^2} = \text{const} ; \quad (10)$$

$$I_{fd} = I_f \cos \alpha; I_{fq} = I_f \sin \alpha . \quad (11)$$

Таким образом, если угол поворота поля регулируется по закону:

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{I_{fq}}{I_f} \right), \quad (12)$$

то для выполнения условия (8) дополнительно требуется регулировать ток  $I_{fd}$  так, чтобы имело место первое соотношение (11).

Поскольку речь идет о диапазоне  $\alpha \leq 30$  эл. град., то с достаточной точностью можно записать (в рад.):

$$\alpha = \frac{I_{fq}}{I_f}, \quad (13)$$

и, как результат, алгоритмы управления существенно упрощаются (например,  $\alpha \approx I_{fd}$ ).

Если допустить, что  $I_{fd}$  ( $F_{0d}$ ) вообще не регулируется (для дальнейшего упрощения системы управления), то есть  $I_{fd} = \text{const}$ , то при  $\alpha = \pm 30$  эл. град. изменение результирующей э.д.с.  $E_0$  составит приблизительно 12 %.

Синхронная машина с симметричными обмотками возбуждения имеет единственное преимущество – неограниченный диапазон регулирования фазы магнитного поля. Недостатки, а именно: а) практически новый ротор, необходимость решения комплекса конструкторских и технологических задач для его изготовления и б) реверсивная система возбуждения, делают этот вариант практически не конкурентоспособным по сравнению синхронизированной асинхронной машины.

В синхронизированной асинхронной машине посредством алгоритма регулирования токов в фазах обмотки ротора, предложенного в [3, 4], можно

получить диапазон регулирования угла поворота поля, равный  $\pm 30$  эл. град. (при более сложном алгоритме можно получить такой же диапазон регулирования фазы магнитного поля, как и в случае машины с симметричными обмотками возбуждения). Изменение результирующей э.д.с.  $E_0$  при этом не превышает 13 %. Следует отметить, что указанный алгоритм не требует реверса токов в фазных обмотках ротора, что значительно упрощает систему возбуждения.

Преимущества этого варианта: а) машина имеет стандартную конструкцию (никаких переделок, длительного опыта изготовления); б) существенно более простая система возбуждения.

Практическое применение этого варианта в конкретных установках дает дополнительные преимущества связанные с возможностью перевода машины в асинхронный режим работы. Они обеспечивают пуск с оптимальными параметрами, сравнительно простое регулирование частоты вращения и т.д. [3]. Указанную совокупность преимуществ удастся получить только при применении синхронизированной асинхронной машины.

### Выводы.

1. Разработаны основы теории регулирования фазы магнитного поля возбуждения синхронной машины.

2. Проанализированы возможности синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением по диапазону регулирования фазы магнитного поля. Установлено, что наилучшим вариантом по этому параметру является синхронная машина с симметричной системой обмоток возбуждения, а наилучшим – явнополюсная машина, в которой поперечная обмотка возбуждения размещается вместо пусковой (демпферной) обмотки. Синхронизированная асинхронная машина, система возбуждения по [3], в этом ряду занимает промежуточное положение диапазоном регулирования фазы магнитного поля, равным  $\pm 30$  эл. град.

3. Разработаны предварительные рекомендации по применению синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением в ветроэнергетических установках и двухдвигательных приводах буровых лебедок, шаровых мельниц и т.д. Показано, что наиболее предпочтительным вариантом для указанных установок является применение синхронизированной асинхронной машины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулкадыров А.И. Принципы и устройства для выравнивания нагрузки между синхронными двигателями в двухдвигательном приводе // Ученые записки АГНА. – 1997. – №3. – С.95-101.
2. Абдулкадыров А.И. Пути создания и области применения синхронных машин продольно-поперечным возбуждением. // Нефть и газ. – 1997. – №4. – С. 91-94.
3. Абдулкадыров А.И. Новый принцип синхронизации асинхронного двигателя // Электротехника (РФ) – 1998. – №4. – С. 17-20.

Стаття надійшла 19.04.2008 р.