

УДК 621.313

СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН

АБДУЛКАДЫРОВ Т.А.

АзНИПИИ Энергетики

Синхронизированная асинхронная машина (САМ), интерес к которой в последнее время все более возрастает, представляет собой асинхронную машину (АМ) 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]. 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 работе [4] рассмотрен вопрос применения САМ в качестве генератора ветроэнергетической установки (ВЭУ).

В статье рассматриваются системы возбуждения САМ различного назначения, построенные на принципиально новой основе.

Известные схемы синхронизации АМ позволяют получить синхронную машину (СМ) с одноосным возбуждением, которая по сравнению со стандартной СМ имеет скорее всего недостатки, чем преимущества [4,5]. В работах [2-4] использован отличный от известных решений подход, при котором фазные обмотки ротора АМ питаются постоянным током по специальному алгоритму, что позволяет получить свойства СМ с продольно-поперечным возбуждением, имеющей по сравнению с машиной обычной конструкции значительно улучшенные характеристики [6]. Это касается демпфирования колебаний и повышения устойчивости работы при резкопеременной нагрузке, а также возможности регулирования фазы магнитного поля возбуждения. Указанные положительные свойства САМ наилучшим образом отвечают условиям работы, например, генератора ВЭУ, характеризуемой резкими и практически непрерывными изменениями вращающего момента на валу.

В качестве разгонного двигателя для пуска крупных синхронных машин САМ, построенная на указанном принципе, обеспечивает условия идеальной синхронизации СМ с питающей сетью. Процесс протекает следующим образом. В начале САМ работает как АД с фазным ротором. При подходе к подсинхронной частоте вращения АД путем подачи постоянного тока в фазные обмотки ротора синхронизируется с сетью. В этом состоянии пускаемая машина также вращается с синхронной частотой, однако условия идеальной (точной) синхронизации еще не обеспечиваются. Подключение главной машины к сети в указанном состоянии сопровождается бросками тока такого же порядка, как и при асинхронном пуске [1]. При использовании предлагаемых схем синхронизации регулированием токов возбуждения в продольной и поперечной осях САМ изменяется угол между векторами м.д.с. главной и вспомогательной машин и, тем самым, обеспечиваются условия точной синхронизации.

Из имеющихся на сегодня схем синхронизации асинхронной машины наибольший интерес представляет схема [2], представленная на рис.1. В этой схеме при стан-

дартной конструкции фазного ротора АМ реализуется принцип продольно-поперечного возбуждения СМ.

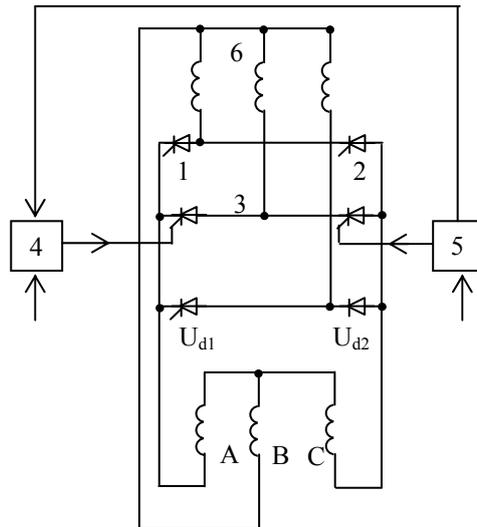


Рис. 1. Система возбуждения синхронизированной асинхронной машины

Ниже анализируется работа этой системы. Она включает 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.

Токи в фазах определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= (2U_{d1} + U_{d2})/3R, \\ I_B &= (U_{d1} - U_{d2})/3R, \\ I_C &= (U_{d1} + 2U_{d2})/3R \end{aligned} \right\} \quad (1),$$

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 α_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 реализуется 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

$$\begin{aligned}
 a &= \arctg(I_{fq} / I_{fd}) = \\
 &= \arctg\left[\sqrt{3}U_{d2} / (2U_{d1} + U_{d2})\right]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Поскольку в данном случае $I_{fd} = const$, то фаза поля возбуждения однозначно будет определяться током I_{fq} или же углом управления α_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 АМ позволяет получить СМ продольно-поперечного возбуждения с диапазоном изменения фазы магнитного поля возбуждения, составляющим ± 30 эл. град.

Из рассмотрения работы системы возбуждения можно сделать следующие выводы: максимально возможное соотношение токов составляет $I_{fq} / I_{fd} = 1 / \sqrt{3}$ (как показано в [6], оно является достаточным для обеспечения различных режимов СМ с продольно поперечным возбуждением); система возбуждения обеспечивает реверсирование тока в одной из обмоток (I_{fq}). Осуществляется это просто, без дополнительного тиристорного преобразователя и сложных алгоритмов управления.

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.	α , 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

Однако эта схема не позволяет достичь полностью независимого регулирования токов возбуждения в обмотках и, тем самым может иметь ограниченное применение.

Ниже рассматривается способ синхронизации асинхронной машины, свободный от указанного недостатка, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. В этой схеме от одного источника с напряжением U_{f1} питаются последовательно соединенные две фазные обмотки ротора, например А и С, а от второго источника с напряжением U_{f2} питается третья фаза В. Из векторной диаграммы можно усмотреть, что угол между векторами м.д.с. $\sqrt{3}w_2 I_{f1}$, созданный комбинацией фаз А и С, и вектором м.д.с. фазы В $w_2 I_{f2}$ составляет 90° . Здесь w_2 – число витков фазной обмотки ротора, а I_{f1} и I_{f2} токи в указанных обмотках.

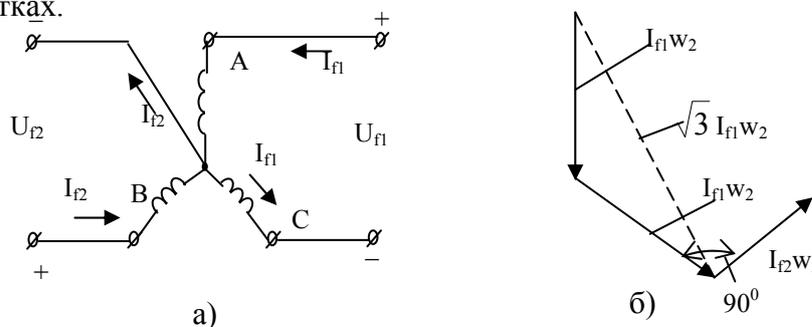


Рис. 2. Схема синхронизации асинхронной машины

Из сказанного следует, что мы получили систему продольно – поперечного возбуждения. Это основное преимущество данной схемы. Другое преимущество этой схе-

мы заключаются в большей, чем в известных схемах, величине м.д.с. Покажем это. Обозначим меньший вектор м.д.с. через F_{fq} , а второй - F_{fd} . Примем $I_{f1}=I_{f2}=I_f$.

Результирующая м.д.с. обмотки ротора от постоянного тока

$$F_f = \sqrt{F_{fq}^2 + F_{fd}^2} = \sqrt{(w_2 I_f)^2 + (\sqrt{3} w_2 I_f)^2} = 2 w_2 I_f \quad (5)$$

Величина результирующей м.д.с. обмотки ротора в асинхронном режиме

$$F_2 = 1,5\sqrt{2} w_2 I_2 \quad (6)$$

Приравнявая м.д.с. F_f и F_2 найдем

$$I_2 = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_f \quad (7)$$

Имея в виду, что длительно допустимая величина постоянного тока не должна превышать номинальный ток ротора в асинхронном режиме, получим

$$I_2 = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_{2n} \quad (8)$$

Обозначим $I_2/I_{2n} = \kappa_{af}$ и назовем его коэффициентом схемы. В рассматриваемой схеме

$$K_{af} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \approx 0,943 \quad (9)$$

В известных схемах [1], а также в схеме [2,3] максимальная величина этого коэффициента составляет

$$K_{af} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816 \quad (10)$$

Таким образом, данная схема создает в $2/\sqrt{3} \approx 1,15$ раз большую м.д.с., чем лучшая из известных схем синхронизации асинхронной машины. Поскольку развиваемая мощность электрической машины определяется как м.д.с. статора, так и м.д.с. ротора, то преимущество предлагаемой схемы становится очевидным.

На рис. 3 приведена схема одного из возможных вариантов тиристорной системы возбуждения синхронизированной асинхронной машины, которая реализует способ синхронизации по рис. 2.

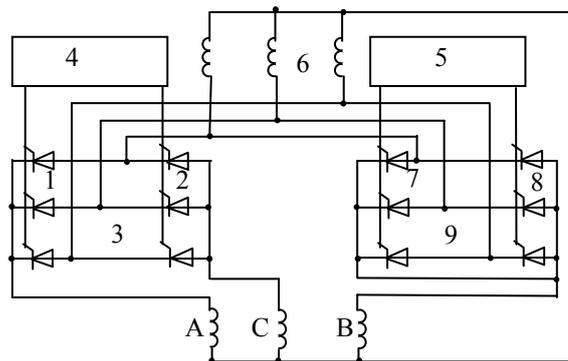


Рис. 3. Универсальная система возбуждения синхронизированной асинхронной машины

В приведенном на рис. 3 варианте системы возбуждения знак м.д.с. F_{fd} не меняется, поэтому комбинация фаз А и С питается от нереверсивного тиристорного выпрямителя 3. По поперечной оси осуществляется знакопеременное возбуждение, поэтому фазная обмотка В питается по реверсивной схеме от тиристорных групп 7 и 8. Отме-

тим, что питание фазных обмоток осуществляется от сети через общий согласующий трансформатор с одной вторичной обмоткой 6.

Преимущества системы возбуждения по рис. 3 по сравнению с ранее рассмотренной (рис. 1) заключается в том, что в ней осуществляется раздельное и независимое регулирование продольного (I_{fd}) и поперечного (I_{fq}) токов возбуждения. Наряду с этим, она не препятствует работе машины в асинхронном режиме. Именно по этой причине данная схема названа универсальной.

Вместе с тем она имеет существенный недостаток – требует размещения на роторе дополнительного контактного кольца. Так как в стандартной машине такая возможность отсутствует, то для практической реализации данной схемы требуется переделка ротора на стадии изготовления машины.

Нами разработана схема возбуждения, которая не требует размещения на роторе дополнительного контактного кольца. Для этого обмотка ротора стандартной асинхронной машины подвергается пересоединению, согласно рис. 4.

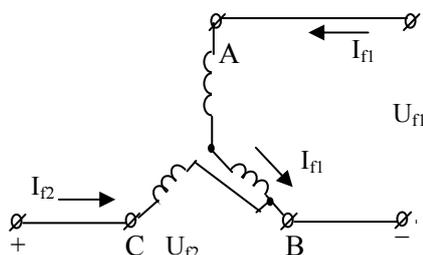


Рис. 4. Схема пересоединения обмотки ротора асинхронной машины

Следует отметить, что такое изменение возможно в реальной машине и осуществимо достаточно просто в «домашних» (эксплуатационных) условиях. Для этого конец Z фазы CZ выводится из общей точки соединения и подсоединяется к началу фазы ВУ.

На рис. 4 показано, как следует подсоединять к зажимам фазных обмоток ротора источники постоянного тока с напряжениями U_{f1} и U_{f2} . Из векторной диаграммы на рис. 2,б, видно, что комбинация фаз АХ и ВУ образует м.д.с. $\sqrt{3} I_{fq} w_2$, а фаза CZ – м.д.с. $I_{fd} w_2$. Векторы указанных м.д.с. сдвинуты относительно друг друга на 90° эл. град., что и указывает на образование системы продольно – поперечного возбуждения.

На рис. 5 приведена тиристорная система возбуждения для рассматриваемого варианта. Здесь группа 1 тиристоров питает фазы АХ и ВУ, а группа 2 – фазу CZ ротора асинхронной машины; 3 – выпрямитель, образованный из упомянутых групп; 4, 5 – система фазового управления соответственно группами 1 и 2; 6 – вторичная обмотка согласующего силового трансформатора.

Для уменьшения пульсации тока в фазной обмотке CZ тиристорную группу 2 можно подключить к отпайке вторичной обмотки трансформатора.

Анализ этой системы показывает следующее. Токи в фазах I_{f1} и I_{f2} регулируются абсолютно независимо друг от друга. Взаимное влияние тиристорных групп 1 и 2 отсутствует. Диапазон регулирования фазы магнитного поля возбуждения, образованного совместным действием токов I_{f1} и I_{f2} , практически ничем не ограничен (в отличие от схемы рис. 1).

При необходимости реверсирования токов I_{f1} и I_{f2} в схему вводится дополнительный тиристорный выпрямитель, а трансформатор с целью лучшего согласования параметров и повышения надежности выполняется с двумя вторичными обмотками 5,6. Этот вариант схемы приведен на рис. 6.

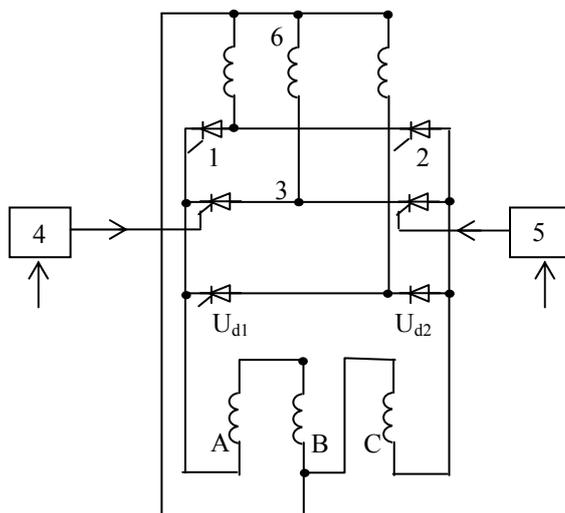


Рис. 5. Тиристорная система возбуждения синхронизированной асинхронной машины с пересоединением обмотки ротора

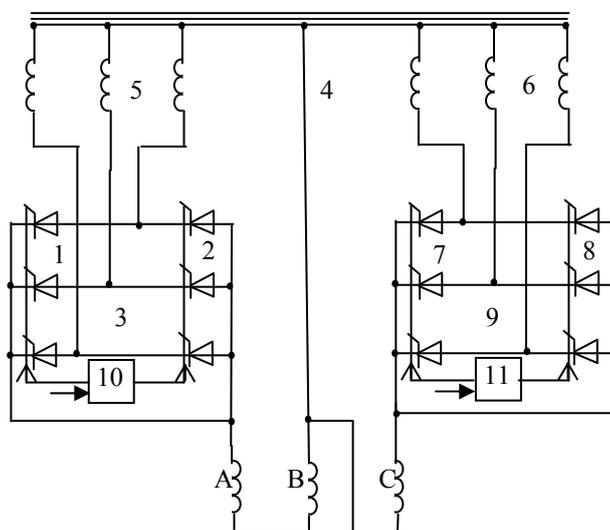


Рис. 6. Реверсивная система возбуждения синхронизированной асинхронной машины

Недостаток данной схемы очевиден. Предлагаемое пересоединение обмотки ротора приведет к нарушению ее симметрии, что вызовет ухудшение показателей машины в асинхронном режиме. Для получения хороших пусковых характеристик можно симметризовать обмотку. Однако это касается только процесса пуска. Вопросы работы данной машины в асинхронном режиме требуют отдельного рассмотрения.

В заключении проведем сопоставительный анализ разработанных систем возбуждения и покажем области их применения.

Для схемы по рис. 1 не требуется какая – либо переделка машины – используется АМ стандартной конструкции. Асинхронному режиму ничто не препятствует. Это главное ее преимущество. Возможности регулирования фазы магнитного поля возбуждения ограничены. С учетом этого САМ с такой схемой синхронизации рекомендуется применять в качестве разгонного двигателя, в приводе буровой лебедки, а также может быть использована в качестве генератора ВЭУ.

Схема по рис. 2, хотя и имеет лучшие показатели, чем схемы по рис. 1 и 4, однако ее реальное воплощение проблематично. Прежде чем идти на предлагаемую переделку машины, следует для конкретного объекта просчитать все преимущества и недостатки этой системы.

Обратимся к схемам на рис. 4 и 5. Требуемое в этих случаях пересоединение обмотки ротора можно осуществить в «домашних» условиях, т.е. практическое воплощение данных систем более реально, чем системы по рис. 2. Их преимущества и недостатки были подробно рассмотрены выше. Область применения – механизмы, в которых требуется большой диапазон регулирования углового положения роторов.

ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты разработки тиристорных систем возбуждения синхронизированных асинхронных машин различного назначения.
2. Отличительная особенность этих систем заключается в том, что они реализуют принцип продольно – поперечного возбуждения.
3. САМ, основанные на этом принципе, приобретают новые полезные свойства:
 - в качестве разгонного двигателя для пуска крупных синхронных машин обеспечивает условия идеальной синхронизации;
 - в приводе буровой лебедки возможность работы в асинхронном и синхронном режимах позволяет улучшить энергетические показатели установки, а также решать вопросы демпфирования колебаний, что особенно важно при возникновении резонансных условий;
 - в качестве генератора ВЭУ повышает к.п.д., коэффициент мощности и устойчивость параллельной работы генератора при порывах ветра.

-
1. Глебов И.А., Шулаков Н.В., Круятков Е.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин. // Л.: Наука, 1988.
 2. Абдулкадыров А.И. О применении синхронизированного асинхронного двигателя для привода буровой лебедки. // Азербайджанское нефтяное хозяйство 1997, №7, с. 28-30.
 3. Абдулкадыров А.И. Новый принцип синхронизации асинхронного двигателя. // Электротехника (РФ), 1998, №4, с. 17-20.
 4. Мустафаев Р.И., Абдулкадыров А.И. Применение синхронизированного асинхронного генератора в ветроэнергетической установке // Проблемы энергетики, 2003, №1, с. 28-32.
 5. Shinryo J. "Induction Synchronous Motor". // Mitsubishi denki giho / 1984, V.38, No 6, p. 24-28.
 6. Абдулкадыров А.И. Пути создания и области применения синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением // Нефть и газ (изв. Высш.учеб. заведений), 1997, №3-4, с.91-95.

SİNXRONLAŞDIRILMIŞ ASİNXRON MAŞINLARININ TƏSİRLƏNMƏ SİSTEMLƏRİ

ABDULQƏDİROV T.A.

Məqalədə asinxron maşının sinxronlaşdırılmasının yeni üsuluna baxılır. Bu üsul təsirlənmə maqnit selini artırmaqla uzununa-eninə təsirlənən sinxron maşın əldə etməyə imkan verir. Məqalədə belə maşınların təsirlənmə sistemlərinin təhlili aparılır.

EXCITATION SYSTEMS OF SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS MACHINE

ABDULKADIROV T.A.

In paper the new way of synchronization of the asynchronous machine is discussed. This way to realize direct and quadrature axes excitation of the synchronous machine. Are considered thyristor systems of excitation of such machines.