

ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ж.ДАВИДЯН

Государственный инженерный университет Армении

Представлен новый способ импульсного пуска и управления скоростью синхронных электродвигателей, реализуемый посредством питания статорной обмотки импульсами тока непосредственно от сети через тиристорный коммутатор. Импульсы тока синхронизированы с положением ротора и регулируются по фазе и по ширине. Способ импульсного управления обеспечивает плавный управляемый пуск двигателя при питании непосредственно от сети переменного тока без перегрузки машины и сети.

Массо-габариты и стоимость оборудования импульсного управления в несколько раз меньше, чем известных устройств.

Ключевые слова: импульсное управление, синхронный электропривод, статорная обмотка, тиристорный коммутатор, фаза импульсного тока, перегрузка сети.

Синхронные электродвигатели обладают уникальными характеристиками – возможностью генерирования реактивного тока и его регулирования, (соответственно уменьшения потерь энергии в сети и в двигателе), стабилизацией напряжения в сети, высокой статической и динамической перегружаемостью. Это предопределило широкое использование синхронных двигателей в мощных электроприводах (примерно до 1...20 МВт) на энергетических объектах. Таковыми являются электроприводы турбокомпрессоров на магистральных газо- и нефтепроводах, электроприводы агрегатов собственных нужд на тепловых электростанциях (насосы питающей воды, дутьевые вентиляторы, дымососы), компрессорные агрегаты на металлургических предприятиях и др.

При питании синхронного двигателя от трёхфазной сети переменного тока в машине создаётся вращающееся поле, которое захватывает возбуждённый ротор и приводит его во вращение со строго синхронной скоростью частоты сети независимо от нагрузки. Вращающий момент возникает и регулируется вследствие приложения к валу нагрузочного момента и динамического смещения ротора от синфазного состояния при синхронной скорости. Скорость вращения поля статора, а следовательно, и скорость механического вращения ротора определяется электрической частотой питающей сети – она строго постоянна 50 Гц. Поэтому и строго постоянна и скорость вращения ротора. Это является одним из достоинств синхронного двигателя, но в то же время и ограничивает его эксплуатационные возможности.

Проблема, связанная с невозможностью или сложностью регулирования скорости синхронного двигателя и соответственно приводимого механизма, имеет следующие два аспекта.

1. Пуск синхронного двигателя от неподвижного состояния с доведением скорости вращения до синхронной для синхронизации с сетью.

Наиболее простым и широко применяемым является асинхронный пуск. Суть асинхронного пуска заключается в следующем. Обмотка возбуждения синхронного двигателя замыкается накоротко через активное сопротивление, обмотка статора включается на напряжение промышленной сети. Синхронный двигатель запускается как асинхронный с короткозамкнутым ротором. При достижении подсинхронной частоты

вращения обмотка ротора размыкается и в неё подаётся постоянный ток возбуждения. Машина после нескольких колебаний втягивается в синхронизм.

Прямой асинхронный пуск вызывает опасные (особенно для мощных машин) электрические, механические и тепловые перегрузки: пусковой ток достигает величин порядка 3...5 (иногда до 7) кратных значений номинального тока, температура на поверхности ротора достигает 300...500⁰С. Посадка напряжения на шинах сети при пуске выходит за допустимые стандартом пределы. В момент включения в двигателе возникают ударные моменты вращения, которые отрицательно отражаются на прочности приводимого механизма и самого двигателя – ослабляются крепления лопаток соединённых с двигателем турбокомпрессоров, крепления роторных катушек и лобовых частей статорных обмоток двигателя, узлов сочленения двигателя и механизма.

2. Изменение скорости вращения нагруженного синхронного двигателя в технологических целях.

Для ряда мощных производственных механизмов, приводимых во вращение синхронными двигателями – компрессоров, вентиляторов, насосов и др. - наиболее целесообразным способом регулирования их производительности является изменение скорости вращения. Рациональным явилось бы создание экономичных тяговых приводов переменного тока с приемлемыми массо-габаритными и стоимостными характеристиками.

При невозможности регулирования скорости двигателя производительность агрегата (в сторону уменьшения) изменяется закрытием задвижки на пути нагнетаемого рабочего тела – газа, жидкости, т.е. искусственным увеличением потерь. При этом резко уменьшается КПД двигателя и увеличиваются относительные электрические потери. В энергетическом отношении это крайне неудовлетворительное решение.

Изменение и регулирование скорости вращения синхронных двигателей в настоящее время возможно их частотным управлением, т. е. изменением частоты и напряжения питания двигателя посредством специальных регулируемых тиристорных преобразователей частоты и напряжения (ТПЧ), рассчитанных на мощность двигателя. Это весьма сложные устройства, которые по своим массо-габаритным, материалозатратным, стоимостным характеристикам соизмеримы с двигателем, а иногда и хуже таковых. Питание синхронных двигателей через такие промежуточные преобразователи ограничивает естественные возможности синхронных двигателей – устойчивость, перегружаемость, регулирование реактивного тока и напряжения в системе, создаёт дополнительные потери энергии в преобразователе, сети и двигателе.

Возможен также частотный пуск синхронных двигателей посредством ТПЧ – пуск что то же управление скоростью – со всеми изложенными недостатками.

Указанные сложности и недостатки способов и устройств пуска и управления скоростью зачастую практически исключают саму возможность регулирования скорости синхронных двигателей посредством ТПЧ, особенно для мощных синхронных двигателей (порядка 1...20 МВт), в то время как именно для мощных синхронных двигателей задача регулирования скорости, в том числе их надёжного пуска, наиболее актуальна. В пределах практических возможностей остаются асинхронный пуск и дроссельное регулирование производительности (регулированием положения задвижки), что, как отмечалось, крайне нецелесообразно.

Автором разработан принципиально новый способ и устройство импульсного пуска синхронных двигателей, который обеспечивает их плавный управляемый пуск при питании непосредственно от сети переменного тока практически без перегрузки машины и сети [1-3]. Этим способом и устройством возможно и управление скоростью нагруженного синхронного двигателя [4].

Принцип импульсного управления заключается в следующем. В якорную обмотку статора возбуждённого двигателя через тиристорный коммутатор пропускаются

дозированные импульсы тока, которые, взаимодействуя с потоком ротора, создают импульсные моменты вращения. Импульсы тока, протекающие в обмотке статора, взаимодействуя с потоком возбуждения, создают импульсы вращающего момента. Если среднее значение импульсных моментов вращения превосходит момент сопротивления нагрузки, то скорость вращения ротора импульсно-ступенчато увеличивается. Если эти моменты уравновешены, то скорость вращения будет неизменна.

Импульсный пуск синхронного двигателя выполняется по схеме, приведённой на рис.1. Обмотка якоря синхронного двигателя (СМ) соединяется непосредственно с сетью переменного тока через пары тиристоров (тиристорный коммутатор ТК). Система управления коммутатором (СУ) соединена синхронизирующими связями с сетью и с датчиком положения ротора (ДПР). В зависимости от текущего положения ротора отпираются тиристоры анодной или катодной группы коммутатора так, чтобы направление тока в обмотке статора соответствовало положению ротора и создавался положительный вращающий момент. Изменением угла формирования импульса (угла управления) можно регулировать длительность, амплитуду, площадь импульсов тока в обмотке статора и тока возбуждения в роторной обмотке и соответственно величину вращающего момента, а следовательно, и скорость вращения.

Указанный принцип создания вращающего момента в корне отличается от традиционных – асинхронного или синхронного.

При асинхронном или синхронном принципах в машине создаётся вращающееся поле, соответственно необходим источник трёхфазного напряжения. При необходимости изменения скорости частота и напряжение питания должны регулироваться. Это создаёт вышеуказанные проблемы.

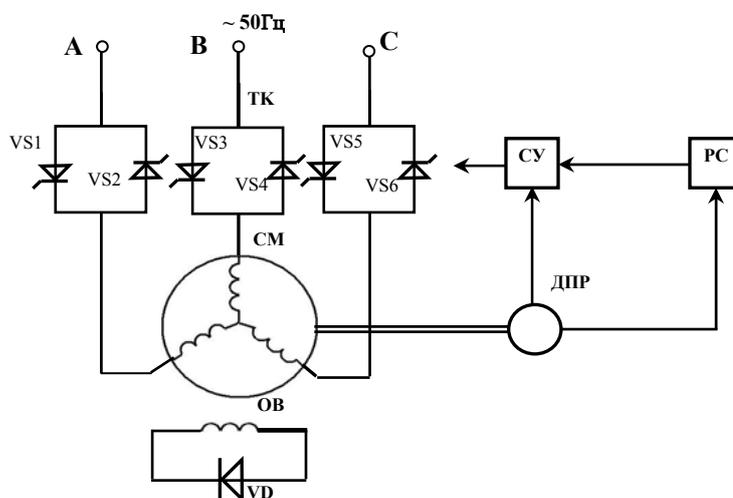


Рис.1. Схема импульсного пуска синхронного двигателя:

СМ – синхронный двигатель; ТК – тиристорный коммутатор; Д – диод; ДПР – датчик положения ротора; СУ – система управления; ОВ – обмотка возбуждения

При импульсном принципе на интервале существования импульса в обмотке статора протекает однонаправленный – “постоянный” ток, который взаимодействует с постоянным потоком возбуждения и создаёт момент вращения. Величина момента вращения регулируется величиной тока, т.е. шириной и амплитудой импульса, что вполне поддаётся внешнему управлению независимо от частоты питания и скорости вращения. В машине отсутствует вращающееся поле. В принципе нет необходимости в трёхфазном

питании (пуски осуществлялись и при питании двигателя по одной фазе с заземлённой нейтралью).

Исследования, проведённые на компьютерной модели, и испытания на реальных образцах мощных синхронных машин подтверждают изложенные положения.

На рис.2 представлен процесс образования импульсов тока в обмотке статора.

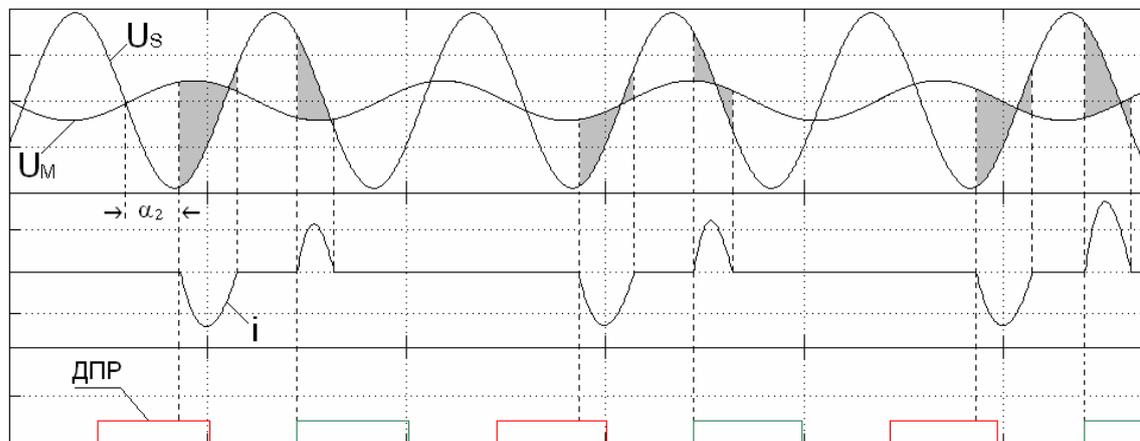


Рис.2. Процесс образования импульсов тока в обмотке статора при скорости 25 Гц

На рис.2 на осях последовательно сверху вниз изображены: 1) напряжение сети U_s ; противоЭДС двигателя U_M ; угол управления (формирования импульсов) α_2 ; 2) импульсы тока i ; 3) разрешающие сигналы датчика положения ротора ДПР.

Выражение импульса тока в обмотке статора имеет вид:

$$i_s(t) = \frac{1}{L_s} \int_{\alpha}^{t_k} [U_s \sin \omega_1 + U_M \sin(\omega_p t + \gamma_0)] dt,$$

где U_s , U_M – амплитуда напряжения сети и противо-ЭДС двигателя; L_s – индуктивность обмотки статора; ω_1 – частота сети; ω_p – скорость вращения ротора; α – угол управления; γ_0 – начальное угловое положение ротора; t_k – момент времени окончания импульса тока.

Величина импульсного вращающего момента определяется следующим образом:

$$M(t) = C \cdot i_s(t) \cdot i_b(t) \cdot \sin \gamma(t),$$

где C – конструктивная постоянная машины; $i_s(t)$ – функция импульса тока в обмотке статора; $i_b(t)$ – функция импульса тока в обмотке ротора.

На рис.3 приведена осциллограмма процесса импульсного пуска.

На рис.3 на осях последовательно сверху вниз изображены: 1) разрешающие сигналы датчика положения ротора ДПР; 2) напряжение на обмотке статора двигателя U_M ; 3) импульсы тока в обмотке статора I_M .

Таким образом, при предложенном импульсном управлении синхронная машина проявляет свойства машины постоянного тока. Это принципиально новое явление для машины переменного тока. При этом достигаются новые положительные результаты, принципиально недостижимые для традиционной машины переменного тока – асинхронной или синхронной. А именно – при питании двигателя непосредственно от промышленной сети с неизменной частотой и напряжением достигается следующее.

1. Посредством импульсных токов, протекающих в обмотке статора, в двигателе создаётся регулируемый вращающий момент, что даёт возможность обеспечить плавный пуск и регулирование скорости вращения двигателя внешними средствами, а именно – фазой формирования импульса тока.

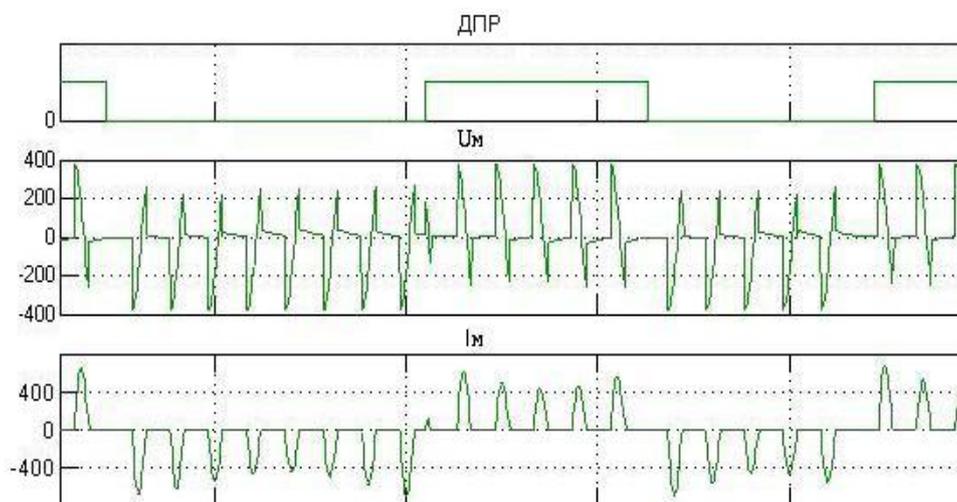


Рис.3. Осциллограмма процесса при импульсном пуске синхронного двигателя типа СТД-800 мощностью 800 кВт при скорости вращения 4,2 Гц

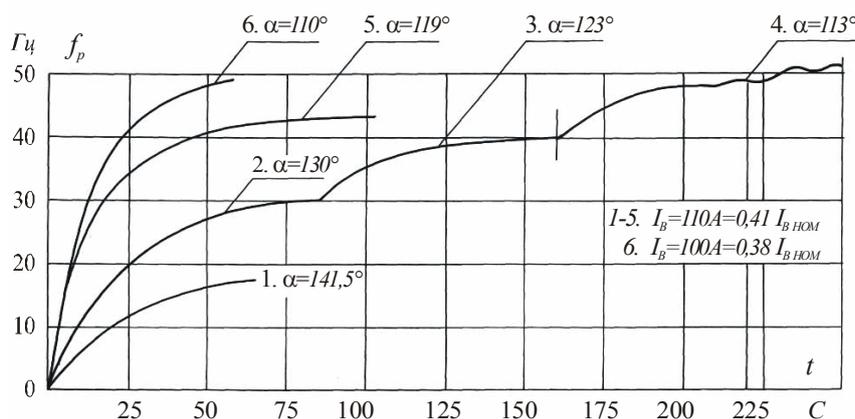
2. Скорость вращения двигателя не зависит от частоты сети – она определяется лишь параметрами и положением импульсов тока. При экспериментах на реальных машинах достигались скорости вращения, соответствующие 75 Гц, т.е. в 1,5 раза выше номинальной.

3. Обеспечивается автоматическое самовозбуждение двигателя и его регулирование независимо от скорости вращения, в том числе при неподвижном роторе. Происходит это таким образом: на интервале времени открытого состояния тиристора и протекания импульса тока к обмотке статора приложен отрезок переменного напряжения сети (затемнённая площадь на рис.2); это напряжение трансформируется в обмотку возбуждения ротора, выпрямляется диодом и вызывает ток самовозбуждения двигателя. Причём величина наведённого тока возбуждения автоматически “согласуется” с условиями создания вращающего момента при данной скорости. Это даёт возможность создать бесщёточные конструкции двигателя без внешних машинных или статических возбудителей.

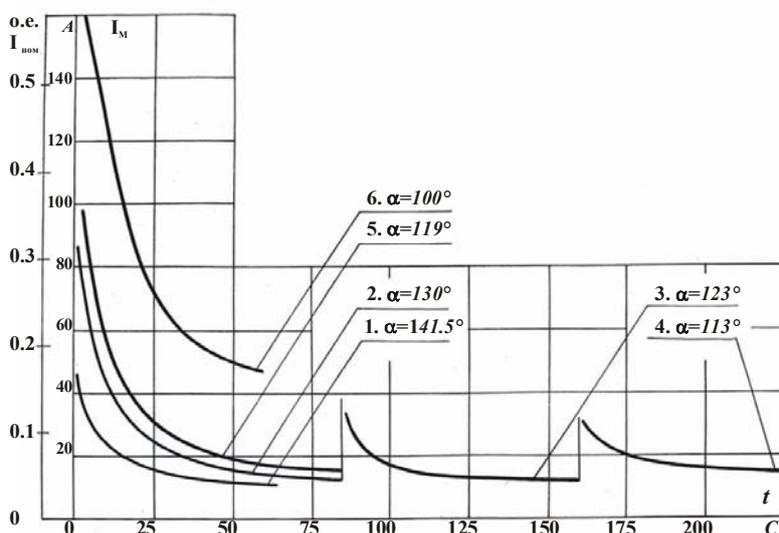
4. Обеспечивается естественная коммутация тиристорного коммутатора, а потому и абсолютная коммутационная устойчивость системы, что исключено при регулировании скорости посредством тиристорных инверторов.

5. Выполняется автоматическая оперативная синхронизация с сетью по завершении пуска и “самозапуск” при кратковременном перерыве питания.

На рис.4 приведены характеристики импульсного пуска синхронного двигателя типа ТДС-2500 мощностью 2500 кВт.



a)



b)

Рис.4. Характеристики импульсного пуска синхронного двигателя типа ТДС-2500 мощностью 2500 кВт:

а - характеристика изменения скорости вращения от времени (пуск от неподвижного состояния) при различных величинах импульсов тока; б - характеристика изменения тока двигателя в процессе пуска

Обозначения и комментарии.

t – время, с; f_p – скорость вращения, эквивалентна частоте, Гц; номинальной скорости вращения соответствует частота 50 Гц; α – угол управления, который определяет величину импульса тока; большим значениям угла управления соответствуют меньшие ширина и амплитуда импульса; I_B – ток возбуждения, $I_{B\text{ ном}}$ – номинальный ток возбуждения; I_M – ток двигателя; ток указан как в абсолютных значениях, так и в относительных единицах в долях номинального тока, $I_M / I_{M\text{ ном}}$.

Как видно из рис.4, обеспечивается плавный импульсный пуск мощного синхронного двигателя при переходном статорном токеб значительно ниже номинального, и установившемся токе порядка 5% номинального.

Массо-габариты и стоимость оборудования импульсного управления в несколько раз меньше, чем известных устройств частотного управления, поскольку при импульсном управлении используется лишь один комплект тиристоров (в тиристорном коммутаторе) против двух (в выпрямителе и инверторе) и высоковольтного реактора, а иногда и согласующих силовых трансформаторов – в известных устройствах.

Указанный способ импульсного управления открывает новое направление в теории и практике управляемых машин переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидян Ж.Д. Системы импульсного пуска мощных синхронных машин. Ереван: Авторское издание. 2007.
2. А.с. 1131002. СССР (Н02Р 1/50). Устройство для пуска синхронной машины / Ж.Д. Давидян, Г.Н. Тер-Газарян. Б.И. 1984.
3. А.с. 1264291. СССР (Н02Р 6/02). Устройство для пуска синхронной машины / И.Е. Овчинников, Ж.Д. Давидян, В.Н. Рябов. Б.И. 1986. N38.
4. Давидян Ж.Д. Управляемый импульсный двигатель переменного тока // Моделирование, оптимизация, управление/В кн.: Сборник научных трудов Государственного инженерного университета Армении. 2003. Вып. 6. N2. Ереван.

Жан ДАВИДЯН, Государственный инженерный университет Армении

Tel.: (+374) 10 53-53-50

E-mail: jan.davidyan@gmail.com