



РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЕГО РОЛЬ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ

А.И. Зайцев
Ю.С. Лядов

Рассматриваются вопросы энергосбережения при использовании регулируемых электроприводов для механизмов с вентиляторной характеристикой, дается оценка электромагнитной совместимости комплекса «преобразователь – регулируемый электродвигатель – питающая сеть».

Энергосбережение (рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии) стало в последние годы одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Энергосбережение в любой сфере сводится к снижению бесполезных потерь. Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что основная составляющая потерь (до 90 %) приходится на сферу потребления.

В течение длительного отрезка времени в России и странах СНГ отпускная цена на энергоносители была значительно ниже фактической стоимости, что не стимулировало оптимизацию энергопотребления и внедрения энергосберегающих технологий. По оценкам специалистов, среднее энергопотребление на единицу валового национального продукта в России в 2–3 раза превышает соответствующие показатели передовых стран мира. Опережающий рост стоимости энергоносителей привел к тому, что энергетическая составляющая в себестоимости готовой продукции на предприятиях достигает 20–60 %. Поэтому чрезвычайную актуальность приобретает разработка комплекса технических и организационных мероприятий, направленных на оптимальное использование энергетических ресурсов. Для решения этих задач принят Федеральный закон «Об энергосбережении» от 3 апреля 1996 г. Закон регулирует отношения, возникающие в процессе деятельности в области энергосбережения, в целях создания экономических и организационных условий для эффективного использования энергетических ресурсов.

Из спектра различных решений, применяемых для энергосбережения, одно из наиболее эффективных и быстро окупаемых, требующих относительно небольших капиталовложений – внедрение высокотехнологичной и наукоемкой

энергосберегающей техники – частотно-регулируемых асинхронных приводов, позволяющих оптимизировать режимы работы турбомеханизмов в широком диапазоне изменения нагрузок.

К таким механизмам относятся питательные, сетевые, циркуляционные, подпиточные насосы, тяго-дутьевые вентиляторы на электростанциях, а также многие тысячи насосов, обеспечивающих снабжение горячей и холодной водой, отопительные системы и другие объекты коммунального хозяйства. Около 25 % вырабатываемой электроэнергии потребляется электроприводами турбомеханизмов.

Традиционные способы регулирования подачи насосных и вентиляторных установок осуществляются дросселированием напорных линий и изменением общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров.

Эти способы регулирования направлены на решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта воды или газа.

Применение регулируемого электропривода турбомеханизмов позволяет создать новую энергосберегающую технологию, в которой экономится не только электроэнергия, но и сберегается тепловая энергия и сокращается расход воды за счет снижения ее утечек при превышениях давления в магистрали.

Дополнительно новая энергосберегающая технология в вентиляторных установках с большой суммарной мощностью позволяет регулировать мощность в часы максимума нагрузки и тем самым сократить затраты на электроэнергию при двухставочном тарифе. При частотном регулировании насосов можно в значительной степени избежать аварийных ситуаций за счет предотвращения гидравлических ударов, возникающих при изменении режимов работы и пуске системы при нерегулируемом электроприводе.

Электромагнитная совместимость в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ–АД)

В автономных инверторах напряжения (АИН) формирование выходных сигналов осуществляется методами широтно-импульсной модуля-

ции (ШИМ) прямоугольной формы одинаковой амплитуды, но разной длительности, полезная составляющая которой имеет форму синусоиды заданной частоты и амплитуды.

Крутизна фронта импульсов определяется скоростью переключения импульсов напряжения силовых ключей автономных инверторов напряжения. При использовании различных полупроводниковых приборов она составляет для тиристорных SCR 4–10 мкс, для транзисторов IGBT 0,05–0,1 мкс.

Существенно более высокое быстродействие транзисторов IGBT, являющееся преимуществом для реализации высокочастотной широтно-импульсной модуляции и минимизации потерь энергии в АИН и АД, негативно проявляется в протекании переходных процессов в цепи АИН – соединительный кабель – АД на интервалах времени фронта. В этом случае, согласно теории цепей, кабель следует рассматривать как однородную длинную линию с распределенными параметрами. Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает в кабеле волновые процессы, приводящие к появлению перенапряжений на зажимах двигателя [1].

Кабель, длина которого соизмерима с длиной волны, считается «длинным кабелем». Критической считается длина кабеля, равная половине длины волны, при которой к обмоткам АД прикладываются импульсы напряжения, близкие к двойному напряжению.

Волновые процессы наиболее опасны для изоляции обмотки АД, так как в ней могут возникать значительные перенапряжения (до 1000 В) при номинальном напряжении 400 В [2]. При быстром нарастании напряженности электрического поля на фронте волны в изоляции машины возникают заметные диэлектрические потери. Увеличение несущей частоты ШИМ с целью улучшения энергетических показателей преобразователей частоты и приближения полезной составляющей выходного напряжения преобразователя к синусоиде также приводит к повышению вероятности возникновения перенапряжений и увеличению диэлектрических потерь. В результате этих процессов срок службы изоляции АД сократился до 3–4 лет. Методы ШИМ-управления, оказав благотворное влияние на выходной ток АИН и приблизив его к синусоиде, одновременно превратили ранее «безболезненную» для двигателя прямоугольную форму выходного напряжения в серию прямоугольных импульсов, следующих с высокой частотой и имеющих передний фронт высокой крутизны.

Электромагнитная совместимость АИН и АИТ с питающей сетью

Выбор типа преобразователя для частотно-регулируемого привода связан в первую

очередь с решением задачи компенсации реактивной мощности нагрузки. Любой автономный инвертор как ключевой коммутатор при работе на индуктивную нагрузку должен содержать в своем составе конденсаторы в качестве энергопоглотителей для исключения перенапряжений при мгновенной коммутации тока с фазы на фазу двигателя. В автономном инверторе тока такие конденсаторы находятся на стороне нагрузки (на стороне переменного тока). Как любые токовые источники подобного типа, они содержат в звене постоянного тока дроссель большой индуктивности, работающий как фильтр. Схемная модификация первых автономных инверторов тока (АИТ), в которой компенсирующие конденсаторы через мост обратных диодов были вынесены на сторону постоянного тока, получила в дальнейшем название автономного инвертора напряжения (АИН), поскольку, оказавшись на входе инвертора, конденсаторы стали одновременно играть роль С-фильтра, придав такому инвертору свойства источника напряжения. На протяжении нескольких десятилетий именно вид входного фильтра являлся основным классификационным признаком АИТ и АИН.

При исследовании проблемы электромагнитной совместимости преобразователей частоты необходимо рассмотреть два самостоятельных вопроса: высшие гармоники, генерируемые преобразователем в сеть (коэффициент искажений), и потребляемая из сети реактивная мощность (фактор $\cos\varphi$).

В ПЧ с АИТ сетевой преобразователь представляет собой управляемый (тиристорный) выпрямитель, работающий на сглаживающий дроссель большой индуктивности.

Высшие гармоники тока, генерируемые сетевым выпрямителем ПЧ с АИТ в питающую сеть, относительно невелики, поскольку ступенчато-прямоугольная форма входного тока обеспечивает реальный коэффициент гармоник не ниже 0,96–0,97. При правильном выборе согласующего трансформатора или сетевого реактора в мощных преобразователях коэффициент искажения напряжения в точке подключения без дополнительных мероприятий не превышает нормируемое значение 5 %.

Иная картина при работе ПЧ с АИН. Здесь сетевой преобразователь – это неуправляемый (диодный) выпрямитель, работающий на емкостный фильтр.

Форма сетевого тока такого преобразователя в общем случае представляет собой несколько синусоидальных импульсов, возникающих при заряде емкости фильтра. Гармонический состав такого тока крайне неблагоприятен. Для его улучшения необходимо устанавливать реакторы и на вход выпрямителя, и в звено постоянного тока (LC-фильтр). Причем сводить всю индуктивность только в одно место схемы не рекомендуется, так как при этом ухудшаются

другие характеристики выпрямителя (либо $\cos\varphi$, либо коэффициент искажений напряжения).

По вопросу потребления реактивной мощности картина достоинств и недостатков ПЧ с АИТ и ПЧ с АИН зеркально меняется. В ПЧ с АИТ в номинальном режиме сетевой $\cos\varphi = 0,87-0,9$ и ухудшается (снижается) пропорционально величине выходного напряжения инвертора. В ПЧ с АИН сетевой $\cos\varphi$, как правило, не ниже значения 0,97. Улучшение сетевого $\cos\varphi$ для ПЧ с АИТ решается путем установки на вход компенсирующих или фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ). Такое ФКУ, решая одновременно задачу фильтрации 5, 7 и 11-й гармоник, оказывается весьма небольшим и недорогим благодаря использованию современных малогабаритных косинусных конденсаторов. Таким образом, ни ПЧ с АИТ, ни ПЧ с АИН в классическом варианте своего построения не обладают необходимой электромагнитной совместимостью с сетью и требуют установки дополнительных устройств, поставляемых как опции.

Существенно улучшить электромагнитную совместимость АИТ с сетью можно путем замены управляемого выпрямителя на управляемый выпрямитель с искусственной коммутацией.

Технико-экономические показатели

Не следует, однако, думать, что переход от нерегулируемого к регулируемому электроприводу (РЭП) является тривиальной задачей, решаемой путем простой замены одного типа электропривода на другой. Этот переход требует в общем случае и изменения технологического процесса. Правильное применение регулируемого электропривода приводит к изменению и упрощению технологического цикла, автоматизации технологического процесса. В этой связи целесообразен пересмотр в ряде случаев как технологических схем, так и норм проектирования с тем, чтобы наиболее эффективно использовать преимущества РЭП. Это особенно важно, если учесть, что капитальные затраты, связанные с установкой регулируемого электропривода, превышают таковые по сравнению с нерегулируемым электроприводом. Разработка технико-экономического предложения, обосновывающего решение о внедрении РЭП, должна базироваться в каждом конкретном случае на технико-экономическом анализе, учитывающем все факторы эффективности. Целесообразность затрат на РЭП, позволяющих отказаться от дросселирования рабочей среды механическими устройствами регулирования (направляющими аппаратами, регулирующими клапанами и т.п.), определяется не только экономией электроэнергии и топлива, но и рядом других факторов, к которым относятся возможность дополнительной выработки электроэнергии в максимуме нагрузки энергоблока

за счет повышения КПД технологического процесса, увеличение межремонтного периода и сокращение затрат на ремонты электротехнического и тепломеханического оборудования, экологический эффект, проявляющийся в уменьшении выброса в атмосферу загрязняющих веществ. Регулируемый электропривод как способ энергосбережения, по данным многочисленных зарубежных и отечественных исследований, а также практики считается окупаемым, если период окупаемости не превышает пяти лет. Такой подход к окупаемости проектов внедрения РЭП является традиционным для промышленно развитых стран, в которых проблемы энерго- и ресурсосбережения решаются на основе долгосрочной государственной политики.

Следует отметить, что с предельным сроком окупаемости в ряде стран связан средний срок списания первоначальной стоимости энергосберегающего оборудования. Так, например, в США после амортизационной реформы 1981 года этот срок сокращен до пяти лет, что явилось мощным экономическим рычагом ускорения обновления оборудования в пользу нового энергосберегающего, соответствующего передовому уровню техники и технологии.

Большие сроки окупаемости относятся к наиболее дорогостоящим проектам, например, автоматизации крупной насосной с мощными сетевыми насосами, оснащенными РЭП, реконструкции водопитательной установки котлов мощных энергоблоков с заменой в ряде случаев насосных агрегатов и оснащением их РЭП и т.п.

Эффективность применения регулируемого электропривода можно охарактеризовать важными интегральными показателями.

Коэффициент удельной экономии электроэнергии, учитывающий вклад 1 кВт установленной мощности регулируемого электропривода в экономию электроэнергии, можно определить как

$$K_{\text{Э}} = \text{Э} / P_{\text{рэн}},$$

где Э – экономия электроэнергии (кВт·ч / год);
 $P_{\text{рэн}}$ – установленная мощность двигателя (кВт).

Если $K_{\text{Э}} > 800$, то оснащение механизмов собственных нужд РЭП, как правило, оказывается целесообразным.

Литература

1. Калашников Б.Е. Проблемы «длинного кабеля» в электроприводах с IGBT-инверторами // Электротехника. - 2002. - № 12. - С. 24–26.
2. Беспалов В.Я., Зверев К.Н. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователей // Электротехника. - 1999. - № 9. С. 56–59.