

Ковалева Ю. В., аспирант

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

kvn.kharkov@mail.ru

Энергоэффективность асинхронных тиристорных электроприводов характеризуется следующими показателями: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности и электромагнитная совместимость, то есть, влияние электроприводов на показатели качества электроэнергии. В статье сформулированы научные задачи, решение которых позволит реализовать повышение показателей энергоэффективности. Получено уравнение энергетического баланса мощности асинхронного двигателя при тиристорном управлении, в которое входят такие составляющие: активная тепловая и механическая мощность, реактивная мощность от главного магнитного потока и от потоков рассеяния. Выполнен анализ методов расчета реактивной мощности при несинусоидальных режимах. Получена формула для расчета коэффициента полезного действия с учетом влияния гармонических составляющих тока на формирование вращающего момента двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный регулятор напряжения, реактивная мощность, коэффициент полезного действия, конденсаторы.

Актуальность темы. Электроприводы турбомеханизмов (вентиляторы, воздуходувки, дымососы, насосы и др.) по статистике составляют около 20% от общего количества электроприводов. Механическая нагрузка на валу таких электроприводов плавно возрастает с увеличением скорости, что благоприятно согласуется с формой механической характеристики асинхронного двигателя [1]. Устойчивая работа на падающем участке механической характеристики двигателя дает возможность реализации регулирования скорости изменением напряжения статора с помощью тиристорных регуляторов напряжения мощностью до 10 кВт. Необходимый технологический диапазон регулирования скорости турбомеханизмов, как правило, не превышает 2:1. Это дает возможность устойчивой работы на падающем участке механической характеристики двигателя без применения датчиков обратной связи по скорости, что удешевляет стоимость и упрощает эксплуатацию по сравнению с частотными электроприводами. Энергоэффективность асинхронных тиристорных электроприводов характеризуется следующими показателями: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности и электромагнитная совместимость, то есть, влияние электроприводов на показатели качества электроэнергии. Для повышения показателей энергоэффективности необходимо составить перечень задач, решение которых и позволит это сделать.

Анализ публикаций. Коэффициент мощности характеризует эффективность потребления электроэнергии и указывает на наличие реактивной составляющей мощности, которая не преобразуется в тепловую и механическую ра-

боту двигателя, а циркулирует между двигателем и подстанцией, создавая потери мощности (нагрев) в линиях и трансформаторах. Для определения реактивной мощности при несинусоидальных режимах, в том числе тиристорных асинхронных электроприводов, известно три основных метода [2,3], что указывает на их неоднозначность, а значит требует анализа их сущности. Уместно отметить, что ни один из методов не прошел экспериментальных проверок.

Коэффициент полезного действия характеризует эффективность преобразования электроэнергии в механическую мощность на валу двигателя и, естественно, уменьшается при тиристорном регулировании, то есть, требуется превышения мощности двигателя. В известной литературе [4] вводится понятие коэффициента превышения мощности двигателя, однако методика его определения достаточно сложная и носит графо-аналитический характер. При этом в явном виде не показана зависимость коэффициента полезного действия от гармонического состава токов, зависящего от угла управления тиристорами.

Что касается электромагнитной совместимости, то есть, влияния асинхронных тиристорных электроприводов (АТЭП) на качество электроэнергии, то эти вопросы в известной литературе детально не рассматривались.

Цель статьи. Сформулировать научные задачи, решение которых позволит выбрать и реализовать пути повышения энергоэффективности АТЭП.

Материал и результаты исследований. Очевидно и естественно, что реактивная мощность является функцией угла управления тири-

сторонами. Проведем анализ известных способов определения реактивной мощности АТЭП с целью ее компенсации. Первый частотный метод [2,3] представляет несинусоидальную мгновенную реактивную мощность суммой произведений гармоник напряжения и тока. Но согласно метода Фурье несинусоидальную периодическую кривую можно представить суммой гармоник этой же кривой, но не суммой произведений двух других несинусоидальных периодических кривых. Другими словами, несинусоидальная мгновенная реактивная мощность может быть представлена суммой гармоник реактивных мощностей, но не суммой произведений гармоник двух кривых: напряжения и тока. Следовательно, частотный метод противоречит математическим основам метода Фурье, поскольку $Q = \sum q_i \neq \sum U_i I_i \sin \varphi_i$. Чтобы устранить это неравенство частотный метод вводит понятие "мощность искажения" (в другой литературе еще встречаются понятия "мощность сдвига", "мощность несимметрии"), но при этом не указывает единиц измерения, не указывает преобразуется в работу или нет. Таким образом, физическое содержание этих понятий не раскрыто, из чего следует, что "мощность искажения" это просто погрешность вычисления реактивной мощности. Надо отметить, что частотный метод в полной мере согласуется с известным методом расчета электрических цепей, а именно – мето-

$$S_s = \sum_{k=1}^{13} (U_{ks} I_{ks}) = R_s \sum_{k=1}^{13} I_{ks}^2 + \sum_{k=1}^{13} (I_{ks}^2 X_{ks}) + \sum_{k=1}^{13} (I_{ks}^2 X_{ks\sigma}), \quad (2)$$

где $S_s = \sum_{k=1}^{13} (U_{ks} I_{ks})$ – полная мощность, которая потребляется фазой статора из сети; $P_s = R_s \sum_{k=1}^{13} I_{ks}^2$ – активная мощность, которая преобразуется в нагрев обмотки статора; $\sum_{k=1}^{13} (I_{ks}^2 X_{ks\sigma})$ – реактивная мощность от магнитных потоков рассеивания, силовые линии которых замыкаются через воздушный зазор; $\sum_{k=1}^{13} (I_{sk}^2 X_{sk})$ – реактивная мощность от главного магнитного потока, силовые линии которого замыкаются через сердечники статора и ротора, то есть эта мощность трансформируется в обмотку ротора.

Второй интегральный метод [4] используется в теории преобразовательной техники, согласно которого вводится понятие "приведенная реактивная мощность", которая рассчитывается формулой, $Q = U_m^2 \cdot \sin^2 \alpha / 4\pi \cdot R$, где U_m, α, R

дом (принципом) суперпозиции (ток в контуре с множеством источников определяется как сумма токов от каждого источника в отдельности).

Используя 2-й закон Кирхгофа и метод суперпозиции (метод Фурье), запишем уравнение электрического равновесия обмотки фазы статора в комплексной форме с учетом разложения магнитного потока на главный и рассеяния и соответствующих им индуктивных сопротивлений: главного и рассеяния

$$\sum_{k=1}^{13} U_{ks} = R_s \sum_{k=1}^{13} I_{ks} + \sum_{k=1}^{13} (I_{ks} X_{ks}) + \sum_{k=1}^{13} (I_{ks} X_{ks\sigma}), \quad (1)$$

где U_{ks}, I_{ks} – действующие значения гармоник напряжения и тока; $X_{ks}, X_{ks\sigma}$ – индуктивные сопротивления обмотки статора схемы замещения: главного и рассеяния для соответствующих гармоник, $\sum_{k=1}^{13} X_k = \sum_{k=1}^{13} \kappa \omega_s L_s$; L_s – индуктивность обмотки фазы статора; R_s – активное сопротивление фазы статора; ω – круговая частота сетевого напряжения.

Умножим уравнение (1) на действующее значение полного тока фазы статора и получим уравнение баланса мощности фазы статора

– соответственно амплитуда сетевого напряжения, угол управления тиристором и активное сопротивление цепи. Появление этой мощности поясняется тем, что при тиристорном управлении ток появляется с фазовым сдвигом относительно напряжения источника. Но, уместно, отметить, что угол α фазового сдвига переднего фронта графика тока не равняется углу φ фазового сдвига его заднего фронта и не может считаться признаком потребления реактивной мощности.

Величина фазового сдвига заднего фронта тока является функцией от индуктивности обмотки и, следовательно, от реактивной мощности $\varphi = f(Q)$. В синусоидальных цепях по величине функции, то есть угла φ , можно найти аргумент, то есть реактивную мощность $Q = S \cdot \sin \varphi$. При несинусоидальных режимах это невозможно. При анализе энергетических процессов в асинхронных тиристорных электроприводах понятие "реактивной мощности" должно быть однозначным, то есть таким что однозначно отождествляет процесс обмена электроэнергией без ее преобразования в работу.

Третий метод использует понятие мгновенной реактивной мощности, как скорости (частоты) изменения электромагнитной энергии, но не предлагает практические методы определения реактивной мощности и способов ее компенсации.

Таким образом, из рассмотренных методов определения реактивной мощности АТЭП в наибольшей степени отвечает физическим процессам регулирования частотный метод, но необходимо решить первую научную задачу повышения точности расчета реактивной мощности для расчета необходимой емкости компенсирующих конденсаторов.

Рассмотрим вопрос повышения коэффициента полезного действия АТЭП. Основным отличием асинхронных двигателей от двигателей постоянного тока является передача электроэнергии на ротор путем ее трансформации из обмотки статора. При питании асинхронных двигателей от тиристорных регуляторов напряжения к обмоткам статора прикладывается несинусоидальное напряжение. В этом случае для оценки процесса преобразования электроэнергии в механическую работу в дополнение к методу Фурье применяют метод симметричных составляющих, поскольку в трехфазных цепях гармоники имеют различные фазовые сдвиги. Известные расчеты показали, что гармоники напряжения №№1,7,13 имеют прямую последовательность, то есть создают вращающий момент двигателя в прямом направлении; гармоники напряжения №№5,11 имеют обратную последовательность, то есть создают противоположный (тормозной) момент двигателя; гармоники напряжения №№3,9 нулевой последовательности не имеют фазового сдвига, то есть создают неподвижное магнитное поле и, следовательно, тормозной момент.

Зависимость действующего значения 1-й гармоники и высших гармоник тока статора от угла управления тиристорами приведена в [2], откуда следует, что при тиристорном управлении гармоники тока №№7,9,13 в сумме составляют меньше 1% от 1-й гармоники, что в первом приближении позволяет их не учитывать. Тогда принимаем, что в обмотку ротора трансформируются гармоники тока статора №№1,3,5. При этом гармоники №№3,5 создают тормозные моменты, а вращающий момент на валу ротора

$$E_{1R} I_{1R} = U_{1s} I_{1s} - I_{1s}^2 (R_s + X_{1s} + X_{1s\sigma}) = I_{1R}^2 (R_R + X_{1R\sigma}) + M_1 \omega_R, \\ U_{1s} I_{1s} = I_{1s}^2 (R_s + X_{1s} + X_{1s\sigma}) + I_{1R}^2 (R_R + X_{1R\sigma}) + M_1 \omega_R \quad (9)$$

где $U_{1s} I_{1s} = S$ – полная мощность электроэнергии фазы двигателя по 1-й гармонике; $I_{1s}^2 R_s + I_{1R}^2 R_R + M_1 \omega_R$ – активная мощность

двигателя создает только 1-я гармоника магнитного потока статора с 1-ой гармоникой тока ротора.

Первая гармоника ЭДС ротора трансформируется 1-й гармоникой реактивного тока фазы статора (1-я гармоника главного потока) и при неподвижном роторе определяется формулой

$$E_{1R} = C \omega_{1s} \Phi_{1s}, \quad (3)$$

где C – конструктивный коэффициент двигателя; Φ_{1s} – магнитный поток 1-й гармоники статора; ω_{1s} – угловая скорость вращения вектора магнитного потока статора.

Возникает ток ротора 1-й гармоники, создающий две составляющих магнитного потока ротора: первая, направленная встречно потоку статора, замыкается через сердечники статора и ротора; вторая замыкается в воздушном зазоре и создает ЭДС самоиндукции рассеивания ротора, влияние которой на ток ротора эквивалентуется индуктивным сопротивлением рассеивания ротора. Только 1-я гармоника магнитного потока статора совместно с 1-ой гармоникой тока ротора создают вращающий момент на валу ротора двигателя

$$M = C \Phi_{1s} I_{1R}. \quad (4)$$

При этом скорость ω_R ротора возрастает, а ЭДС скольжения ротора уменьшается из-за уменьшения частоты пересечений магнитным потоком обмотки ротора и равна

$$E_{1RS} = C \Phi_{1s} (\omega_{1s} - \omega_R). \quad (5)$$

Запишем по 2-му закону Кирхгофа уравнение электрического равновесия цепи ротора в комплексной форме для 1-й гармоники

$$C \Phi_{1s} (\omega_{1s} - \omega_R) = I_{1R} R_R + I_{1R} X_{1R\sigma}, \quad (6)$$

или после преобразования получим

$$E_{1R} = I_{1R} (R_R + X_{1R\sigma}) + C \Phi_{1s} \omega_R, \quad (7)$$

Умножим (7) на действующее значение 1-й гармоники тока ротора и получим уравнение баланса мощности ротора по 1-й гармонике

$$E_{1R} I_{1R} = I_{1R}^2 (R_R + X_{1R\sigma}) + C \Phi_{1s} \omega_R I_{1R}. \quad (8)$$

Преобразуем (8) с учетом того, что мощность ротора потребляется от обмотки статора и с учетом формулы (4) момента двигателя получим

фазы двигателя по 1-й гармонике; $I_{1s}^2 (X_{1s} + X_{1s\sigma}) + I_{1R}^2 X_{1R\sigma}$ – реактивная мощность фазы двигателя по 1-й гармонике;

Из уравнения (1) следует, что нагрев обмотки статора двигателя при питании от тиристорного регулятора напряжения создается суммой всех гармоник тока, а момент на валу согласно (9) только 1-ой гармоникой тока ротора, то есть, нагрев двигателя увеличивается относительно его питания синусоидальным током на величину

$$\left(\sum_{k=1}^{13} I_{ks}^2 \right) / I_{1s}^2. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя при его питании от тиристорного регулятора напряжения уменьшается относительно КПД двигателя η при его питании синусоидальным током и равняется

$$\eta_{\text{АТЭП}} = \eta \frac{I_{1s}}{\sum_{k=1}^{13} I_{ks}}. \quad (11)$$

Уменьшение КПД объясняется тем, что вращающий момент двигателя создается только 1-ой гармоникой тока ротора и, следовательно статора, а нагрев, кроме последней, еще и высшими гармоническими составляющими тока ротора и статора. Следовательно, для повышения КПД АТЭП необходимо устанавливать на выходе тиристорного регулятора режекторные фильтры или компенсирующие конденсаторы на входе. Однако при этом необходимо исследовать влияние компенсирующих конденсаторов, которые в этой ситуации одновременно с увеличением коэффициента мощности способствуют повышению КПД двигателя. Это и есть вторая научная задача.

Что касается третьей научной задачи оценки электромагнитной совместимости АТЭП, то есть оценки его влияния на качество электроэнергии и создания электромагнитных помех, то этот вопрос в известной литературе детально не рассматривался. Однако в настоящее время широкого внедрения компьютерных систем управления технологическими объектами и компьютерных систем связи такой анализ следует проводить.

Выводы. 1. Для повышения энергоэффективности АТЭП по коэффициенту мощности необходимо разработать методику определения величины емкости компенсирующих конденсаторов в зависимости от угла управления тиристорами с использованием частотного метода.

2. Необходимо провести исследование влияния компенсирующих конденсаторов на уменьшение состава высших гармоник тока, что позволит повысить коэффициент полезного действия.

3. Необходимо разработать методику оценки влияния несинусоидального режима работы АТЭП на показатели качества электроэнергии в зависимости от мощности подстанции, а также оценить величину электромагнитных помех.

4. В процессе постановки научных задач было получено: а) уравнение баланса мощности АТЭП по 1-й гармонике, которое в отличие от известных содержит составляющую механической мощности и позволяет определить зависимость коэффициента мощности от нагрузки на валу; б) формула для определения коэффициента полезного действия двигателя через отношение 1-й гармоники к сумме всех гармоник, что позволяет определить необходимое завышение мощности двигателя при заданной нагрузке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. М.: Энергия, 1980. 360 с.
2. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1977. 319 с.
3. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: изд-во Новосиб. ун-та, 1990. 220 с.
4. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.