

КОМПЕНСИРОВАННАЯ АСИНХРОННАЯ МАШИНА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

У роботі розглянуто підключення САФ паралельно АМ для покращення пускових характеристик та зменшення витрат енергії.

В работе рассмотрено подключение САФ паралельно АМ для улучшения пусковых характеристик и уменьшения потерь энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое внедрение, частотно регулируемых электроприводов с электрическими машинами переменного тока наиболее распространенным видом промышленного электропривода остается нерегулируемый электропривод с трехфазной короткозамкнутой асинхронной машиной (АМ). Часто номинальная мощность АМ оказывается соизмеримой с установленной мощностью трансформатора, питающего предприятие. В таких случаях возникает проблема пуска АМ, поскольку прямой пуск может приводить к недопустимым провалам напряжения на шинах трансформаторной подстанции, влияющим на работу подключенных к ним нагрузок. Проблема пуска АМ решается включением пусковых реакторов последовательно с обмотками статора или применением полупроводникового преобразователя того или иного типа, например, тиристорного регулятора переменного напряжения (ТРН) [1] или автономного инвертора [2], ограничивающих пусковой ток. Указанные способы пуска требуют дополнительных затрат и не всегда обеспечивают необходимые пусковые характеристики, такие как пусковой момент, потери энергии при пуске, время пуска.

Последние достижения силовой электроники позволили создать эффективные силовые активные фильтры (САФ) на основе силовых транзисторов и накопителей электрической энергии небольшой емкости. В работе [3] показана возможность применения САФ в распределительных сетях электроснабжения для снижения потерь электроэнергии за счет компенсации мгновенной реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности. Принципиально описанный в [3] компенсатор, выполненный на основе САФ, может быть подключен параллельно обмоткам статора АМ, причем не только на период пуска, но и постоянно при длительной работе АМ. Назовем асинхронную машину с параллельно подключенным компенсатором на основе САФ компенсированной асинхронной машиной (КАМ).

КАМ может обладать следующими свойствами:

- в любых режимах работы фазные токи, потребляемые из сети, совпадают либо противоположны по фазе с фазными напряжениями сети;

- при прямом пуске величины пусковых токов КАМ существенно меньше, чем пусковые токи некомпенсированной АМ;

- в установившемся режиме работы мгновенная реактивная мощность на входе КАМ близка к нулю, вследствие чего уменьшаются потери энергии в кабелях и трансформаторе, через которые КАМ подключена к сети, и повышается суммарный КПД системы электроснабжения;

- пусковой момент, развиваемый КАМ, существенно выше по сравнению с пусковым моментом АМ при пуске с помощью ТРН.

В настоящей работе рассматриваются пусковые и рабочие характеристики КАМ, а также КПД системы электроснабжения с КАМ. Дана оценка экономической целесообразности применения КАМ как для режима пуска, так и при длительной работе.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С САФ
Упрощенная схема системы электроснабжения с КАМ приведена на рис. 1.

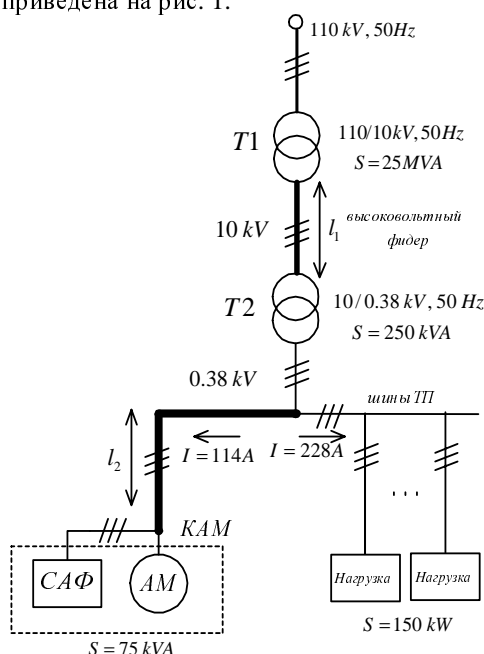


Рис. 1. Упрощенная схема энергоснабжения предприятия

Трансформаторная подстанция (ТП) предприятия подключается к мощному трансформатору Т1 110/10 kV посредством высоковольтного фидера, длина которого (I_1) может достигать нескольких километров. На ТП установлен трансформатор Т2 10/0.38 kV мощностью 250 kVA. Расстояние между шинами подстанции и КАМ (I_2), как правило, составляет от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Параллельно КАМ к шинам трансформаторной подстанции подключены другие нагрузки.

Характеристики системы электроснабжения с КАМ целесообразно рассматривать при конкретных параметрах элементов схемы и АМ.

В настоящей работе рассматривается АМ типа 5АМ280М8 [4]. Параметры схемы замещения АМ, принятые при моделировании, следующие:

- номинальная мощность $P_n = 75$ kVA;
- фазное номинальное напряжение обмоток статора $U_{st\ nom} = 220$ V;
- номинальная частота тока статора $f_n = 50$ Hz;
- активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора $R_{st} = R'_r = 0.063$ Ω ;

– собственная индуктивность статора и приведенная собственная индуктивность ротора $L_{st} = L'_r = 0.00058$ Н;

– взаимная индуктивность статора и ротора $L_m = 0.0174$ Н.

Номинальная мощность других нагрузок, подключенных к шинам 0.38 кВ ТП, составляет 150 кВт, при $\cos \varphi = 0.8$.

Сопротивление кабеля, которым АМ подключена к ТП, рассчитано исходя из того, что при номинальном токе статора АМ плотность тока в кабеле составляет 3 А/мм^2 . Сопротивление высоковольтного кабеля определено при допущении, что его сечение равно 16 мм^2 . Удельная индуктивность кабелей принята равной 1 мкН/м . Длины алюминиевых кабелей, а также их активные сопротивления, индуктивности и другие параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры кабелей

Кабельное соединение на рис. 1	Длина l , м	Индуктивность, $l_{\text{каб}}$, мН	Индуктивное сопротивление, Ω	Эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}}$, Ω
T1-T2	2000	2.0	0.628	4.13
T2-КАМ	100	0.1	0.0314	0.087

Для компенсации реактивной мощности в сети параллельно АМ подключается САФ, выполненный на основе трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) с емкостным накопителем энергии. В векторную систему управления САФ подаются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям напряжений на входе КАМ, токов кабеля КАМ и токов статора АМ. Система управления построена на основе рр-теории мощности [3]. По мгновенным величинам напряжений и токов трехфазной сети согласно приведенным в [3] соотношениям рассчитываются величины активной и реактивной мощности. Сигнал задания по мощности формируется путем фильтрации сигнала фактической активной мощности фильтра низкой частоты второго порядка с частотой среза 10 Нз. По величинам напряжений сети и сигнала задания по мощности рассчитываются сигналы задания фазных токов САФ. Таким образом, САФ практически полностью компенсирует реактивную составляющую и пульсации активной составляющей тока сети и снижает при пуске величину этого тока в 2-3 раза в зависимости от параметров АМ.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В начале интервала пуска АМ напряжение на шинах ТП уменьшается вследствие падения напряжения на трансформаторе Т2 и кабелях. При использовании САФ напряжение на статоре АМ повышается по сравнению с прямым пуском за счет снижения падения напряжения в кабелях и трансформаторе Т2. Для расчета напряжения на шинах ТП и напряжения на статоре АМ в начале интервала пуска рассмотрим эквивалентные схемы системы электроснабжения.

На рис. 2, а приведена схема замещения системы электроснабжения для начального интервала пуска АМ.

Систему целесообразно рассматривать, приведя индуктивность и активное сопротивление высоковольтного кабеля ко вторичной обмотке трансформатора Т2. Тогда схема представляет собой последовательное соединение источника $U_s = 220 \text{ В}$, высоковольтного фидера с приведенным значением активного сопротивления R'_{k1} и приведенным значением ин-

дуктивности L'_{k1} , трансформатора Т2 с активным сопротивлением R_{T2} и индуктивностью L_{T2} , кабеля, которым АМ подключена к шинам ТП, с активным сопротивлением R_{k2} и индуктивностью L_{k2} , и АМ с активным сопротивлением $R_{ам}$ и индуктивностью $L_{ам}$ согласно схеме замещения.

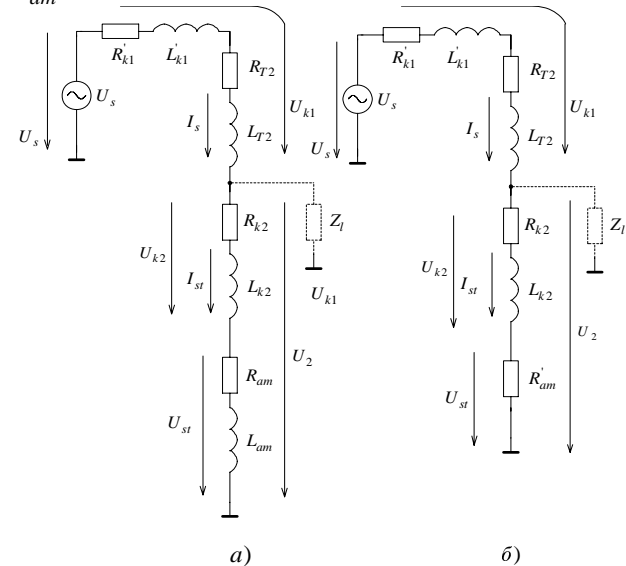


Рис. 2. Эквивалентные схемы системы электроснабжения для начального интервала пуска: а) АМ; б) КАМ

На рис. 2 б приведена схема замещения системы электроснабжения для начального интервала пуска КАМ. АМ с параллельно включенным САФ замещаются эквивалентным резистором с сопротивлением $R'_{ам}$, через которое протекает ток, равный активной составляющей тока АМ:

$$R'_{ам} = \frac{\sqrt{R_{ам}^2 + (\omega_s L_{ам})^2}}{\cos\left(\text{atan}\left(\frac{\omega_s L_{ам}}{R_{ам}}\right)\right)} \quad (1)$$

Подставляя относительные значения $R_{ам} = 0,07$ и $\omega_s L_{ам} = 0,2$, получаем $R'_{ам} = 0,637$. Все расчеты будем проводить в относительных единицах, приняв за базисное значение напряжения номинальное фазное напряжение на вторичной обмотке трансформатора Т2 (220 В), а за базисное значение тока – номинальный ток статора АМ (114 А).

Рассмотрим представленные на рис. 3, векторные диаграммы напряжений и токов при пуске АМ (рис. 3, а) и при пуске КАМ (рис 3, б) в случае, когда остальные нагрузки не подключены к ТП.

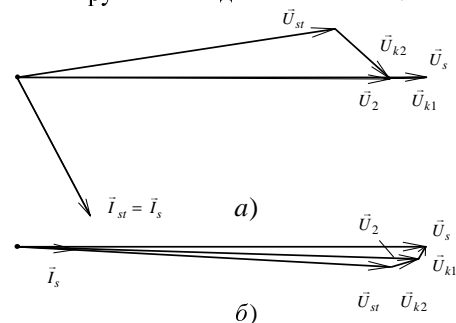


Рис. 3. Векторные диаграммы в начальном этапе пуска: а) АМ, б) КАМ, если к ТП не подключены другие нагрузки

Из диаграммы на рис. 3, а видно, что вектор падения напряжения на высоковольтном кабеле и трансформаторе Т2 \vec{U}_{k1} практически совпадает по фазе с вектором напряжения сети \vec{U}_s . Вектор падения напряжения на кабеле, соединяющем АМ с ТП, \vec{U}_{k2} практически совпадает по фазе с током сети \vec{I}_s , который отстает от вектора напряжения сети на угол равный 62 эл. град. Модуль вектора напряжения на шинах ТП \vec{U}_2 в начальный момент пуска АМ в относительных единицах составляет 0,91. Модуль тока сети в относительных единицах составляет 3,72.

Выбранное соотношение параметров схемы замещения иллюстрирует самый худший с точки зрения провала напряжения на шинах ТП при пуске АМ, поскольку вектор падения напряжения на трансформаторе и высоковольтном кабеле совпадает по фазе с вектором напряжения сети.

При пуске КАМ ток сети в начальном интервале пуска в относительных единицах составляет 1,44, а напряжение на шинах ТП в относительных единицах составляет 0,983. Векторы напряжения статора АМ \vec{U}_{st} и напряжения \vec{U}_2 практически совпадают по фазе с вектором напряжения сети \vec{U}_s . Вектор \vec{U}_{k1} опережает вектор \vec{U}_s на 60 эл. град., поэтому его модуль слабо влияет на модуль напряжения \vec{U}_2 .

На рис. 4 представлены векторные диаграммы напряжений и токов при пуске АМ (рис 4, а) и при пуске КАМ (рис. 4, б) в случае, когда к ТП подключены остальные нагрузки (принято $\cos \varphi = 1$).

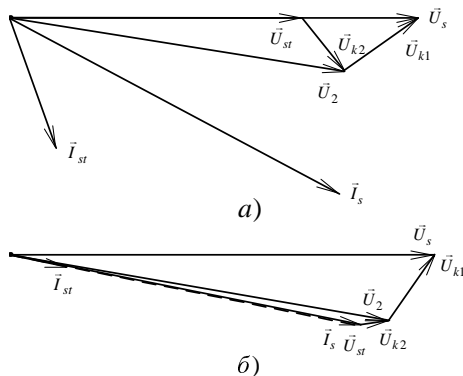


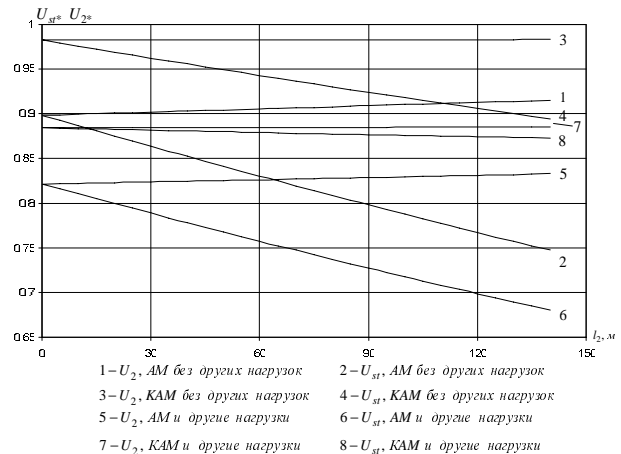
Рис. 4. Векторные диаграммы на начальном этапе пуска: а) АМ, б) КАМ, если к ТП подключены другие нагрузки

Вектор тока сети \vec{I}_s опережает вектор тока статора машины \vec{I}_{st} , поскольку ток других нагрузок активный. Поэтому вектор падения напряжения на высоковольтном кабеле и трансформаторе Т2 \vec{U}_{k1} опережает вектор напряжения сети \vec{U}_s на угол 35 эл. град., а модуль вектора \vec{U}_{k1} составляет 22,3% от напряжения сети. Модуль вектора напряжения на шинах ТП \vec{U}_2 составляет 83% от напряжения сети. Модуль вектора напряжения на статоре АМ \vec{U}_{st} еще меньше и составляет 71,5% от напряжения сети.

При подключении к ТП других нагрузок совместно с КАМ вектор напряжения на шинах ТП практически совпадает по фазе с векторами токов КАМ и других нагрузок. Вектор падения напряжения на высоковольтном кабеле и трансформаторе Т2 опережает

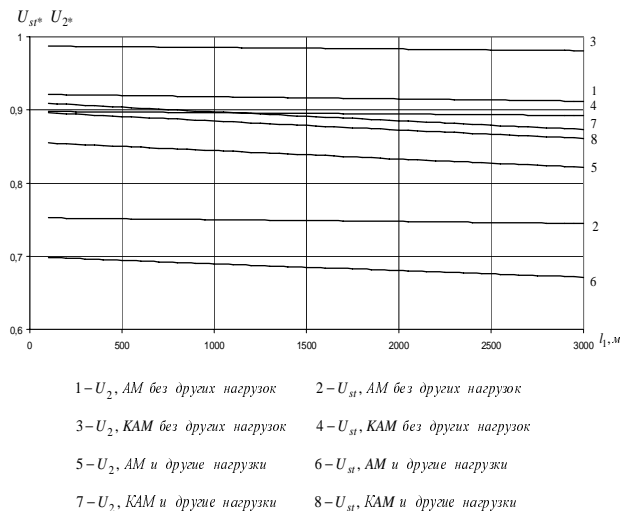
вектор напряжения сети на угол 55 эл. град., а модуль вектора \vec{U}_{k1} составляет 21,8% от напряжения сети. Модуль вектора напряжения на шинах ТП \vec{U}_2 составляет 89% от напряжения сети.

На рис. 5 приведены графики зависимостей напряжения на шинах ТП и напряжения статора АМ от длины кабеля l_2 , соединяющего АМ и ТП, для 4-х случаев (АМ/КАМ, отсутствие/наличие других нагрузок), а на рис. 6 приведены аналогичные зависимости от длины высоковольтного кабеля l_1 .



1 – U_2 , АМ без других нагрузок 2 – U_{st} , АМ без других нагрузок
3 – U_2 , КАМ без других нагрузок 4 – U_{st} , КАМ без других нагрузок
5 – U_2 , АМ и другие нагрузки 6 – U_{st} , АМ и другие нагрузки
7 – U_2 , КАМ и другие нагрузки 8 – U_{st} , КАМ и другие нагрузки

Рис. 5. Графики зависимостей напряжения на шинах ТП и напряжения статора АМ от длины кабеля, соединяющего АМ и ТП



1 – U_2 , АМ без других нагрузок 2 – U_{st} , АМ без других нагрузок
3 – U_2 , КАМ без других нагрузок 4 – U_{st} , КАМ без других нагрузок
5 – U_2 , АМ и другие нагрузки 6 – U_{st} , АМ и другие нагрузки
7 – U_2 , КАМ и другие нагрузки 8 – U_{st} , КАМ и другие нагрузки

Рис. 6. Графики зависимостей напряжения на шинах ТП и напряжения статора АМ от длины высоковольтного кабеля

Из рис. 5 видно, что с увеличением сопротивления кабеля, соединяющего АМ и ТП, при изменении его длины от 0 до 150 м, напряжение на шинах ТП увеличивается на 1,3%, а напряжение на статоре АМ уменьшается на 12,4% и составляет 0,787 при длине кабеля 100 м. Пусковой момент при этом снижается до 0,62 от номинального значения. Напряжение на шинах ТП составляет 0,91 при длине кабеля 100 м. При пуске КАМ ток в сети снижается в 2,5 раза, поэтому напряжение на шинах ТП возрастает до 0,983, а на статоре АМ до 0,918. Необходимо отметить, что повышение напряжения на шинах ТП обусловлено не только уменьшением тока сети, но и изменением угла поворота вектора \vec{U}_{k1} относительно вектора напря-

жения сети (рис. 3). При подключении к шинам ТП других нагрузок, характер изменения напряжений на шинах ТП и на статоре АМ не изменяется. Из рис. 6 видно, что увеличение длины высоковольтного кабеля от 100 до 3000 м приводит к снижению напряжений и на шинах ТП и на статоре АМ. Напряжение на шинах ТП при пуске АМ без других нагрузок снижается на 3.9% при изменении длины высоковольтного кабеля независимо от включения САФ.

Анализируя рис. 5-6, можно сделать вывод, что использование КАМ позволяет поддерживать напряжение на шинах ТП и статоре АМ в пределах -15% от напряжения сети, в тех случаях, когда без САФ эти напряжения снижаются на 30-35%.

Пусковой момент на валу машины пропорционален квадрату напряжения статора, на рис. 7 представлены зависимости пускового момента от отношения мощности сети к мощности АМ при отключении других нагрузок. Мощность сети определяется согласно следующему выражению:

$$P_s = \frac{3U_s^2}{|Z_{k1k2}|}, \quad (2)$$

где $|Z_{k1k2}|$ - модуль суммарного сопротивления кабелей и трансформатора Т2.

Как видно из рис. 7, при отношении мощности машины к мощности сети, равном 0,1, максимальный пусковой момент на валу при прямом пуске снижается в два раза.

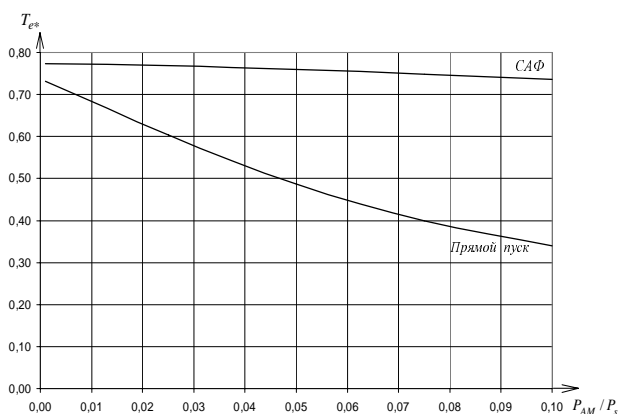


Рис. 7. Зависимость максимального пускового момента от отношения мощности машины к мощности сети

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Потери энергии в кабелях при пуске АМ пропорциональны квадрату действующего значения протекающего в кабелях тока. Для выбранной АМ ток снижается в 2,5 раза по сравнению с прямым пуском, соответственно потери снижаются в 6,25 раза. На рис. 8 представлена зависимость потерь при прямом пуске АМ и пуске КАМ от длины кабеля между АМ и ТП, при вентиляторной характеристике нагрузки на валу. Видно, что при прямом пуске потери в три раза больше.

Проведем расчет величины потерь энергии в кабелях и трансформаторе в установившемся режиме работы АМ с номинальным моментом нагрузки на валу для четырех случаев:

- подключена только АМ;
- подключена АМ и остальные нагрузки;
- подключена только КАМ;
- подключена КАМ и другие нагрузки.

Потери в кабеле, который соединяет АМ с трансформаторной подстанцией, определяется согласно следующему выражению:

$$\Delta P_{l_1} = 3\eta I_1^2, \quad (1)$$

а потери в кабеле, которым подключена АМ, определяются согласно выражению:

$$\Delta P_{l_2} = 3r_2 I_2^2. \quad (2)$$

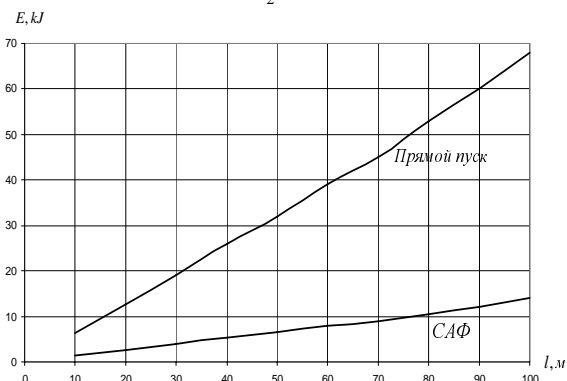


Рис. 8. Зависимость энергии потерь при пуске АМ с вентиляторной характеристикой нагрузки от длины кабеля, которым подключена АМ

Потери в трансформаторе складываются из потерь холостого хода ($P_{ХХ} = 915 \text{ W}$), и потерь короткого замыкания (при номинальной нагрузке $P_{КЗ} = 3400 \text{ W}$), которые пропорциональны квадрату отношения фактического действующего тока к номинальному значению действующего тока I_* :

$$P_{ТР} = P_{ХХ} + P_{КЗ} \cdot I_*^2. \quad (3)$$

Если к трансформаторной подстанции подключена только АМ, то действующее значение тока I_2 равно:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}U_{2л}} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 114 \text{ A}.$$

Действующее значение тока I_1 определяется согласно следующему выражению:

$$I_1 = \frac{I_2}{k_T}, \quad (4)$$

где k_T - коэффициент трансформации,

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1 \cdot 10^4}{380} = 26,3.$$

Если подключена только АМ, то действующее значение тока I_1 равно:

$$I_1 = \frac{I_2}{k_T} = \frac{114}{26,3} = 4,33 \text{ A}.$$

Номинальная мощность потерь в трансформаторе Т2 составляет 4315 W, из них потери холостого хода - 915 W, потери короткого замыкания 3400 W, относительное активное сопротивление обмотки составляет $r_* = 0,026$, а относительное реактивное сопротивление составляет $X_* = 0,075$ [4]; Потери в трансформаторе в первом случае составляют:

$$P_{ТР} = P_{ХХ} + P_{КЗ} \cdot I_*^2 = 915 + 3400 \cdot 0,3^2 = 1221 \text{ W}.$$

Суммарные потери:

$$\Delta P = \Delta P_{l_1} + \Delta P_{l_2} + \Delta P_{ТР}. \quad (5)$$

Если к ТП подключена только АМ $\Delta P = 2683 \text{ W}$.

При подключении к ТП всех нагрузок токи I_1 и I_2 соответственно в 3 раза больше, чем в случае, когда подключены только АМ, и составляют 342 А и 13 А. Суммарные потери в таком случае составляют 16807 W

Если подключена только КАМ, то мощность потерь составляют 2413 W, а если подключены все нагрузки и КАМ, то мощность потерь составляют 14861 W.

Таким образом, относительное снижение потерь, которое рассчитывается согласно следующему соотношению:

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P_{AM} - \Delta P_{КАМ}}{P_{AMном}}, \quad (6)$$

если подключена только АМ:

$$\Delta P_* = \frac{2683 - 2413}{75000} = 0.367\%,$$

если подключены остальные нагрузки:

$$\Delta P_* = \frac{16807 - 14861}{75000} = 2.6\%.$$

Следует отметить, что применение САФ не снимает проблему пульсаций момента на валу АМ. Ток статора АМ, как и при прямом пуске, в 5-7 раз превышает номинальный ток статора и замыкается преимущественно через ключи САФ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КАМ

При питании только АМ и при подключении САФ потери энергии в кабелях уменьшаются на 0,27 kW. При наличии параллельной нагрузки, которая в 2 раза мощнее АМ, при включении САФ потери в кабелях снижаются на 1,95 kW.

Таким образом, экономия электроэнергии в сутки за счет применения КАМ составляет от 6,5 kWh до 47 kWh.

Стоимость АМ типа 5АН280А-8 мощностью 75 kW составляет порядка 4000 USD, а для АМ типа 5АН355В-2 мощностью 400 kW – 10000 USD. [5]

Стоимость САФ на мощность 75 kW составляет примерно 8000 USD.

При стоимости электроэнергии 0.1 USD за 1 kWh срок окупаемости САФ составляет от 3 до 10 лет. Стоимость САФ увеличивается в меньшей степени чем его установленная мощность, а экономия электроэнергии за счет применения САФ пропорциональна мощности привода. При использовании КАМ нет необходимости в отдельном пусковом преобразователе, уменьшается ток в кабелях и трансформаторе.

ВЫВОДЫ

1. Действующее значение тока сети при пуске КАМ в зависимости от параметров машины, трансформатора и кабелей снижается в 2-3 раза по сравнению с действующим значением тока сети при прямом пуске АМ.

2. Максимальный пусковой момент при пуске КАМ практически равен пусковому моменту при прямом пуске АМ от сети с бесконечно большой мощностью.

3. Время пуска КАМ практически не зависит от индуктивности сети и кабелей и равно времени прямого пуска АМ от сети бесконечно большой мощности.

4. С использованием САФ существенно (в 3-5 раз) снижаются потери в кабелях и трансформаторе при пуске АМ.

5. Провал напряжения на шинах трансформаторной подстанции при пуске АМ при подключении САФ уменьшается с 20% до 5%.

6. Применение КАМ, мощность которой сопоставима с мощностью трансформатора на подстанции, снижает величину мощности потерь в системе электроснабжения предприятия в долях номинальной мощности АМ на 2-10% в зависимости от параметров кабелей, соотношения мощности нагрузки и АМ и характера нагрузки на валу машины.

7. Срок окупаемости САФ в составе КАМ зависит от мощности АМ, конфигурации системы электроснабжения и составляет от 3 до 10 лет при стоимости электроэнергии 0.1 USD за 1 kWh.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Бару А.Ю., Шинднес Ю.Л. "Характеристики устройств пуска асинхронных машин, выполняемых на базе тиристорных регуляторов напряжения". Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність", ч. 3, 2005, С. 9-14.
2. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с
3. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения. "Технічна електродинаміка". Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки", част. 2, 2008, С. 80-87.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.
5. Комплектные тиристорные электроприводы. Справочник. / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошквич и др. Под. Ред. Канд.техн.наук В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.: ил.
6. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., Общий курс электропривода. – М., Энергоиздат, 1981. – 576 с.
7. Турбогенераторы, гидрогенераторы, асинхронные машины. НПО "Элсиб".- Новосибирск, 2003. - 30 с.

Поступила 12.05.2009

Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.,
Колесник Виктор Юрьевич, аспирант
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника",
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21,
тел. (057) 7076609, факс (057) 7076312,
e-mail: zhemerov@online.kharkiv.net.