

службы всех составляющих, спрогнозировать возникновение аварий, что приведет к снижению числа отказов и сокращению издержек на эксплуатацию. Так же активно-адаптивная СЭС даст широкий спектр возможностей по контролю и управлению режимом работы электропотребления предприятия, даст возможность своевременно выявлять очаги потерь и нерационального использования ресурса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабакин В.И., Ивашкин О.Н. Анализ гармонического состава напряжения питающей сети с помощью виртуальной модели высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного двигателя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. - №3. – С. 32-42.
2. Сергей Гужов, Оценка влияния источников питания светодиодных светильников на питающую сеть // Современная светотехника. – 2009. - №2. – С.130.
3. Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике // Электротехника. – 2005. - № 11. – С.33.
4. <http://www.zaoplc.ru/>

#### ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Альмиева Д. С., Галеева Р. У.

Казанский Государственный Энергетический Университет, г.Казань

В статье рассматривается влияние несимметрии напряжения по обратной последовательности на характеристики асинхронных электродвигателей большой мощности по каталожным данным, произведены исследования параметров асинхронных двигателей на дополнительные потери в меди.

В связи с широким использованием в химической и нефтехимической промышленности асинхронной нагрузки, в узлах электроснабжения может быть сосредоточено 10 МВт и более асинхронной нагрузки единичной мощностью от 3.2 мВт и выше. Процессы, происходящие в системе, существенно влияют на надежность работы данных узлов и самих асинхронных электродвигателей (АД). Поэтому актуальным становится вопрос качества электрической энергии, показатели которой определены ГОСТ 54149 -2010 [1, 2]. Нормированию подлежат и такие показатели как коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и нулевой последовательности. При несимметричных режимах система напряжений прямой последовательности  $U_1$  создает в обмотках статора и ротора АД токи прямой последовательности, образующие поле  $\Phi_{11}$ , вращающееся относительно ротора со скольжением  $s_1$  и создающее момент прямой последовательности  $M_1$ . Система напряжений обратной последовательности создает в обмотках статора и ротора АД токи обратной последовательности, образующие обратно вращающееся поле  $\Phi_{12}$ , по отношению к которому ротор вращается со скольжением  $s_2 = 2 - s_1$ . Момент  $M_2$ , создаваемый этим полем, будет действовать против направления вращения.

Таким образом, на валу АД возникает небаланс моментов, приводящий к появлению переходных процессов. Уравнение движения при этом будет иметь вид [4].

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_1 - M_2 - M_c \quad (1)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции,  $M_c$  – момент сопротивления.

Появляющийся при несимметрии напряжения избыточный тормозной момент приводит к росту скольжения АД, наступает новый установившийся режим. При определении момента  $M_2$  были использованы формулы, отражающие изменение сопротивление рассеяния  $X_s$  от скольжения [4]:

$$x_s = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{\left(-\frac{1}{\ln s_{кр}}\right)}} \quad (2)$$

где  $x_0$  – синхронное сопротивление;  $x''$  – сверхпереходное сопротивление;  $s_{кр}$  – критическое скольжение

$$x_0 = \frac{1}{\sin \varphi_H - \cos \varphi_H (T'_{1H} \cdot s_H)} \quad \text{Синхронное сопротивление можно определить по формуле [4]} \quad (3)$$

где  $T'_{1H}$  – постоянная времени двигателя в номинальном режиме, определяется по выражению [4]

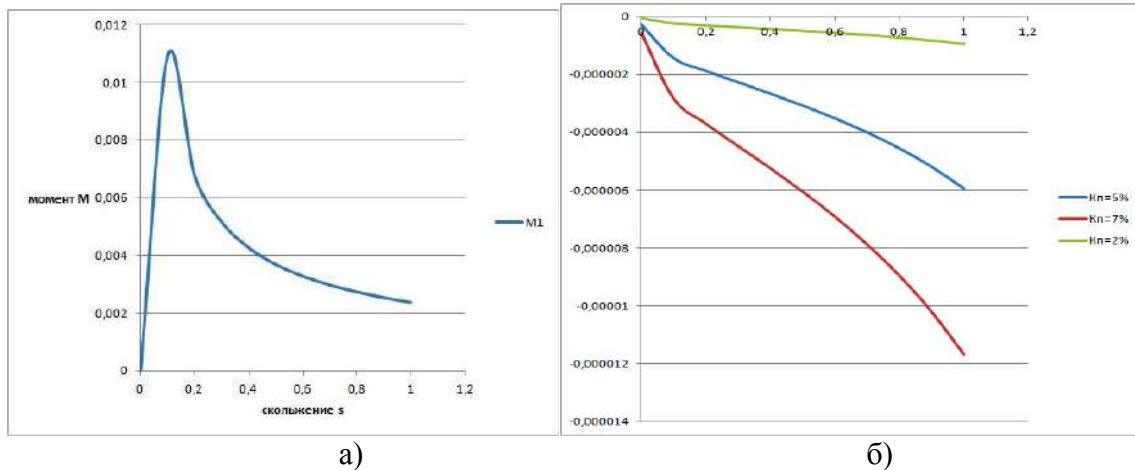
$$T'_{1H} = \frac{M_m \cdot \eta - \sqrt{(M_m \eta)^2 - 1}}{s_H} \quad (4)$$

где  $M_m$ ,  $\eta_H$  – кратность максимального момента, номинальный КПД АД соответственно.

Тогда сверхпереходное сопротивление [4]

$$x'' = \frac{1}{\sin \varphi_H + \cos \varphi_H (M_m \cdot \eta - \sqrt{(M_m \eta)^2 - 1})} \quad (5)$$

Исследование по влиянию встречного момента от действия слагающей напряжения обратной последовательности при коэффициентах несимметрии  $K_H = 2\%, 5\%, 7\%$ , проведенные для высоковольтных АД марок 4А3М-5000-АД, 4А3М-8000УХЛ4, ВАО2 560LA-4 разных мощностей с учетом технических характеристик, показали незначительное его влияние, увеличивающиеся с ростом пускового тока  $I_{п.}$  и понижением напряжения (рис.1). Так при несимметрии 7 %, момент  $M_2$  не превышает десятые доли процентов от максимального. Однако при уменьшении напряжения прямой последовательности на 10 % от номинального происходит пятикратный рост встречного момента  $M_2$ .



**Рис.1.** Кривые моментов прямой и обратной последовательностей в зависимости от скольжения  $s$ : а) прямой момент  $M_1$ ; б) обратный (тормозной) момент  $M_2$  при различных кратностях пускового тока  $I_{\Pi}$

С другой стороны для создания обратного момента трехфазный электродвигатель потребляет дополнительную мощность из сети, что можно рассматривать как дополнительные потери мощности.

Дополнительные потери в меди от несимметрии, отнесенные к номинальной мощности могут быть определены по выражению [3]

$$\Delta P_{\text{доп.АД}} = 2,41 K_{\text{АД}} K_{2U}^2 \quad (6)$$

где  $K_{\text{АД}}$  – безразмерный коэффициент, зависящий от параметров двигателя;  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности

Коэффициент, зависящий от параметров двигателя может быть определен по выражению [3]

$$K_{\text{АД}} = \frac{\Delta P_{\text{М1НОМ}} I_{\Pi}^2}{P_{\text{Н}}} = \frac{R_1 I_{\Pi}^2}{\eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}} \quad (7)$$

где  $P_{\text{Н}}$  – номинальная активная мощность двигателя;  $\Delta P_{\text{М1НОМ}}$  – потери в меди, обусловленные током по основной частоте;  $\Delta P_{\text{М1НОМ}}$  – потери в меди статора при номинальном токе основной частоты;  $I_{\Pi}$  – кратность пускового тока при номинальном напряжении.

Определим зависимость коэффициента  $K_{\text{АД}}$  от каталожных данных – кратности максимального момента, кратности пускового тока, номинального коэффициента мощности при различных кратностях тока холостого хода, используя известные выражения для характеристик АД.

Зависимости номинальных значений  $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$  и  $\sin \varphi_{\text{НОМ}}$  от кратности максимального момента  $M_{\text{max}}$  и кратности тока холостого хода  $\frac{I_{\mu}}{I_{\text{НОМ1}}}$  определены по формулам [4]

$$\sin \varphi_{\text{НОМ}} = \frac{I_{\mu}}{I_{\text{НОМ1}}} + \frac{I'_{2\text{НОМ}}}{I_{1\text{НОМ}} \sqrt{2M_m (M_m + \sqrt{M_m^2 - 1})}} \quad (8)$$

$$\cos \varphi_{\text{Н}} = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{\text{Н}}}$$

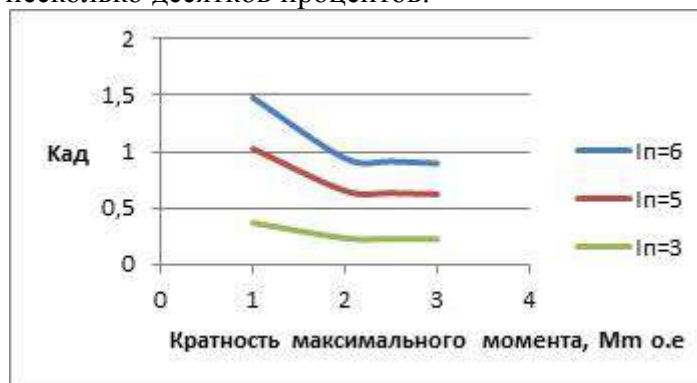
С другой стороны отношение приведенного тока ротора к току статора [4]

$$\frac{I'_{2НОМ}}{I_{НОМ1}} = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{0НОМ}}{I_{НОМ1}}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{M_m + \sqrt{M_m^2 - 1}}{2M_m}} - \frac{I_{0НОМ}}{I_{НОМ1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2M_m(M_m + \sqrt{M_m^2 - 1})}} \quad (9)$$

Таким образом, подставляя выражение относительного тока ротора из выражения (9) в формулу (8) и далее в выражение (7) получим зависимость коэффициента  $K_{АД}$  от параметров асинхронного двигателя.

Таким образом, зная каталожные параметры конкретного двигателя или серии двигателей, можно найти соответствующий коэффициент  $K_{АД}$  для узла нагрузки с двигателями большой единичной мощности для более точного определения потерь мощности в меди при несимметрии напряжения. Были проведены расчеты и построены зависимости  $K_{АД}$  для АД серии 4А при от кратности максимального момента  $M_{max}$  при различных кратностях пускового тока и кратностях тока холостого хода (рис.2).

Так увеличение кратности пускового момента от 1.8 до 2.6 приводит к уменьшению коэффициента  $K_{АД}$  на 25 % при кратности пускового тока  $I_n = 3$  и на 63 %. Из кривых  $K_{АД} = f(M_m)$  следует, что влияние каталожных данных АД на величину  $K_{АД}$  весьма велико. Согласно [4] значение коэффициента  $K_{АД}$  для всей промышленности в целом принимаются равными 1,85. Максимальное значение  $K_{АД}$  для легкой промышленности - 2,91 минимальное – 1,07 для угольной отрасли. Погрешность в определении  $K_{АД}$  может составлять несколько десятков процентов.



**Рис. 2.** Кривые зависимости коэффициента  $K_{АД}$  от кратности максимального момента  $M_m$  при различных кратностях пускового тока

Применяя обобщенные табличные значения  $K_{АД}$  могут возникнуть значительные погрешности в расчетах, что не допустимо с точки зрения перегрева АД.  
 Выводы:

1. Несимметрия напряжения по обратной последовательности оказывает незначительное влияние на вращающий электромагнитный момент мощных высоковольтных АД при напряжении прямой последовательности равном номинальному. При понижении напряжения прямой последовательности встречный момент для АД серии 4А растет в несколько раз, определение которого требует дополнительных данных в зависимости от конструктивных особенностей электродвигателей.

2. Существенное влияние на дополнительные потери мощности меди от несимметрии напряжения по обратной последовательности оказывает кратность максимального момента, кратность максимального тока и кратность тока холостого

хода. При определении  $K_{АД}$  учет конструктивных особенностей высоковольтных АД позволил существенно повысить точность расчетов при определении потерь мощности от несимметрии напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 10 с
3. Дед А.В. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке / А. В. Дед [и др.] // Омский научный вестник. –2013. – №1 (117). – С. 157–158.
4. И.А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Энергоатомиздат, М., 1984.
5. Долингер С. Ю. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер, А. Г. Люгаревич, В. Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. –2013. -№ 2 (120). – С. 178-183.

### ПРОГРАММА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Дворцовой А. И., Тихонов И. А.

Новосибирский государственный технический университет, г.Новосибирск

В настоящее время основной статьей расходов тепловой электрической станции (ТЭС) является приобретение топливных ресурсов для ее стабильного функционирования (~50-60% от всех расходов станции). Поэтому снижение расхода топлива для станции является одной из основных задач. Уменьшение величины израсходованного топлива может быть реализовано с помощью различных мероприятий, таких как:

- совершенствование термодинамических параметров станции (таких как температура и давление перегретого пара и т.д.), что приводит к повышению термодинамического коэффициента полезного действия, благодаря более эффективному использованию энергии в рамках цикла функционирования электростанции;
- введение более совершенного и эффективного оборудования взамен устаревшего (в качестве альтернативы данного мероприятия можно указать проведение ремонта изношенного оборудования как планового, так и капитального);
- внедрение более совершенных систем регулирования технологических процессов, которые позволят снизить перерасход топлива на ТЭС при ликвидации отклонений параметров регулирования от номинальных (оптимальных) значений, согласно режимной карте. Под перерасходом топлива на станции понимается разность между действительно потребленным количеством топлива и его оптимальной величиной, последняя из которых рассчитывается персоналом электростанции). [1]