

УДК 621.313.333

Ан.А.ГУСАРОВ (канд.техн.наук, доц.), Ал.А. ГУСАРОВ, Е.Б. КОВАЛЕВ (д-р техн.наук, проф.)
Донецкий национальный технический университет

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАЩИТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Проведен анализ современных систем температурной защиты асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Введение. Наиболее распространенными электрическими машинами переменного тока, применяемыми в качестве привода механизмов промышленных предприятий, являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АЭД). Данный тип АЭД составляет 95% от всего количества приводных двигателей, используемых в промышленности в настоящее время. Современные экономические условия ставят задачу максимально-эффективного хозяйствования, в том числе максимально жесткую экономию и рациональное использование оборудования. Задача может быть решена за счет продления срока службы оборудования, которое обеспечивается его соответствующей эксплуатацией. Такой подход предопределяет развитие различных методов расчета теплового режима работы и осуществление различных тепловых защит. Опыт эксплуатации показывает, что из всего числа АЭД вышедших из строя 50% выходит по причине нарушения обмоток статора и выплавления стержней ротора вызванной нарушением теплового режима. Это условие приводит к повышенным перегревам двигателя, а, следовательно, к преждевременному старению изоляции и выходу из строя двигателей. На тепловое состояние АЭД оказывают влияние и изменения, происшедшие в элементах двигателя: засорение системы вентиляции, разрушение клетки ротора, подшипников и т.д., приводящие к увеличению нагрева двигателя.

Состояние вопроса. Анализ литературы [1,2] показывает, что системы температурной защиты АЭД можно разбить на два класса: системы, построенные на основе косвенного определения температуры (по величине потребляемого тока); и системы, построенные на основе непосредственного измерения температуры.

Системы температурной защиты АЭД на основе косвенного определения температуры обмотки статора строятся с использованием спецустройства называемым температурным реле, по величине потребляемого тока [3], решающее две основные задачи: 1. Не отключать двигатель во время пуска при кратных пусковых токах; 2. Отключать АЭД при температуре обмотки выше опасной величины.

В основе работы реле положена теория нагрева однородного тела с бесконечно большой теплопроводностью и одинаковой температурой во всех его точках. Допущением принимается, что теплоемкость двигателя (C) и его теплоотдача (A) не зависят от нагрузки на валу двигателя.

Тогда при неизменных во времени потерях ($P_{\Sigma}(t) = const$) и интенсивности охлаждения, т.е. при постоянном тепловом сопротивлении ($R_0(t) = C/A = const$) установившееся значение превышения температуры рассматриваемого тела (обмоток) определяется, как:

$$\theta = P_{\Sigma} \cdot R_0 = I^2 \cdot R \cdot R_0, \quad (1)$$

где $I^2 \cdot R$ - мощность потерь, выделяемая двигателем при протекании тока I по обмоткам с активным сопротивлением R :

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta), \quad (2)$$

где α - температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha=1/250$, для алюминия $\alpha=1/245$).

Температура АЭД зависит не только от нагрузки, но и от температуры окружающей среды $U_{окр}$:

$$\theta(t) = \theta \left(1 - e^{-t/T} \right) = I^2 \cdot R \cdot R_0 \cdot \left(1 - e^{-t/T} \right). \quad (3)$$

При нагрузках отличных от номинальных, потери в обмотках зависят от коэффициента нагрузки $k_i = I/I_{ном}$.

$$\text{Тогда } \theta = k_i^2 \cdot [I_{\text{н}}^2 \cdot R \cdot R_0] \cdot (1 - e^{-t/T}) = k_i^2 \cdot \Theta_{\text{н}} \cdot (1 - e^{-t/T}). \quad (4)$$

В соответствии с (4) косвенную температурную защиту АЭД можно построить, используя четыре различных принципа:

1. По результатам определения времени. Условие срабатывания $t = t_{откл}$.
2. По результатам определения тока. Условие срабатывания $k_i = k_{откл}$.
3. По результатам определения температуры. Условие срабатывания $\theta = \theta_{откл}$.
4. По результатам определения сопротивления обмотки: $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$.

В защитах, построенных по первому и второму принципу (плавкие предохранители, автоматические выключатели с электромагнитным, тепловым или комбинированным расцепителем), задаются определенной временно-токовой характеристикой [4].

Время срабатывания защиты $t_{\text{откл}} = f\left(\frac{U_{\text{откл}}}{U_{\text{ном}}}, T, k_i\right)$ от перегрузки регламентировано международным

стандартом IEC 60947-4-14.7.3. Детально этот вопрос освещен в [3,5].

В защите, построенной по третьему принципу (автоматические выключатели с электронным расцепителем), температура обмотки статора определяется температурным реле как аналоговыми, так и цифровыми. Такие реле способны наилучшим образом срабатывать благодаря созданию для них тепловых моделей, адекватно воспроизводящих температуру обмотки защищаемого АЭД во всех возможных режимах работы.

Для разработки упрощенных тепловых моделей нагрева и охлаждения выбирают одну или две эквивалентные экспоненты, одна из которых относится к стали статора (T_{max}), вторая – к обмотке статора (T_{min}) [6]. Значения T_{max} и T_{min} определяются для нулевых начальных условий методом наименьших квадратов.

Процесс нагрева обмотки представляется выражением:

$$\theta_{i\dot{a}i} = k_i^2 \cdot \Theta_{i\dot{a}i} \cdot k_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{max}}}}\right) + (1 - k_i) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{min}}}}\right), \quad (5)$$

где k_n - коэффициент нагрева, учитывающий составляющую превышения температуры стали в превышении температуры обмотки.

В выражении (5) считается, что нагрев обмотки статора пропорционален k_i^2 . Такое предположение допустимо только для нагрева обмотки статора относительно температуры магнитопровода. Нагрев же магнитопровода обусловлен, помимо тепла, передаваемого от обмотки, еще и потерями в стали. Так как потери в стали зависят от индукции и не пропорциональны квадрату тока, то в общем случае k_n должен быть зависимым от кратности тока, а превышение температуры обмотки не будет пропорциональным квадрату тока.

В защите, построенной по четвертому принципу ($\theta = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0}$) [7] температура обмотки статора

определяется температурным реле по результатам расчета тепловой схемы замещения и измерений питающего напряжения, тока, частоты вращения. Данные температурного реле позволяют построить температурную защиту, осуществлять температурный контроль АЭД.

Обобщая вышесказанное, следует вывод, что система косвенного определения температуры обладает рядом преимуществ:

1. Не требуется установка в АЭД термодетекторов, применима к любым двигателям, т.е. является универсальной.

2. Возможность оценки среднего превышения температуры защищаемой обмотки, что соответствует требованиям ГОСТ 27888-88.

3. Возможность обеспечения защиты двигателя при медленно и быстро нарастающих тепловых перегрузках при обеспечении номинальных условий работы АЭД в соответствии с требованиями ГОСТ 27888-88.

Недостатки системы:

1. Невозможно учитывать влияние $\Delta U_{\text{окр}}$;

2. Невозможно учесть влияние параметров качества энергоснабжения;

3. Невозможно учитывать ухудшения охлаждения от засорения охлаждающих каналов, нарушения в работе подшипников, нарушения в обмотке ротора.

4. Невозможно, в принципе, защищать отдельные элементы конструкции двигателя, например подшипники или поверхность двигателя (важно для взрывонеопасных машин).

Частично недостатки 1, 2 и 3 могут быть устранены введением дополнительных устройств. Например, для учета влияния $\Delta U_{\text{окр}}$ можно применить термодетектор, информация с которого подается в систему тепловой защиты.

Для оценки влияния параметров качества электроснабжения можно применить многофункциональное реле. Для быстронарастающих перегрузок необходимо ввести в схему измерения постоянные времени двигателя, т.е. необходимо моделировать АЭД как тепловую систему, в схему защиты вводить емкости.

В любом случае, введение дополнительных устройств, защита усложняется и становится не универсальной. Требуется введение индивидуальных данных АЭД которые не могут быть определены по каталожным данным и должны определяться по результатам специальных исследований. Поэтому наиболее

перспективним и простым принципом построения температурной защиты можно считать, системы непосредственного измерения температуры обмоток АЭД.

Системы температурной защиты на основе непосредственного измерения температуры обмоток статора предполагают в защищаемый элемент встраивать термодетекторы.

В качестве термодетекторов могут использоваться как элементы с релейной характеристикой, такие как биметаллические выключатели (реле температуры, термостаты), так и элементы, не имеющие релейной характеристики, такие как терморезисторы (термисторы, позисторы).

Весьма перспективным является применение цифровых датчиков температуры благодаря прямому преобразованию температуры в цифровой код. Они имеют высокую точность и позволяют получить защитные системы высокой надежности и хорошего качества. Информация от термодетектора используется для построения температурной защиты, так и для контроля над текущим тепловым состоянием АЭД.

Преимущества системы:

1. Учитывается изменение температуры окружающей среды и изменения в параметрах АЭД как-то - ухудшение охлаждения вследствие засорения охлаждающих каналов, нарушение в работе подшипников.

2. Учитывается влияние на нагрев параметров питающего напряжения.

3. Возможность построения защиты на отдельные элементы АЭД.

Недостатки системы:

1. Невозможно защитить двигатель от быстро нарастающих нагрузок.

2. Не позволяет оценить среднее превышение температуры, что не соответствует требованиям

ГОСТ 27888. Для определения среднего перегрева обмоток необходимо использовать модель двигателя, либо аналоговую, либо цифровую.

Выводы.

1. Сравнивая достоинства и недостатки двух систем температурной защиты, можно сделать вывод, что их совместное использование позволит скомпенсировать индивидуальные недостатки систем защиты. Такая комбинированная система будет оптимальной, т.к. позволит отслеживать режимы быстро и медленно нарастающих тепловых перегрузок с учетом изменения внешних условий. Это позволит разработать защиту с функциями контроля текущего состояния и сигнализации о процессах, приводящих к превышению допустимого нагрева обмоток, с последующим отключением АЭД при достижении в его элементах температуры, которая может привести к их разрушению.

2. Кроме этого, данные термодетектора могут быть использованы для повышения качества математического моделирования теплового состояния двигателя: уточнения начальных условий для расчета и обнуления «ошибок накопления», что позволит избежать ложного срабатывания защиты и учесть влияние на нагрев двигателя внешних факторов.

3. Обе системы температурной защиты направлены на защиту обмотки статора, обмотка ротора остается незащищенной. Для АЭД, работающих в режимах частых пусков, при разработке тепловой защиты необходимо учитывать и температуру обмотки (стержня) ротора, исключая возможность ее выплавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин Е.Н. Защита асинхронных двигателей до 500В / Е.Н. Зимин - М.: Энергия, 1967. – 88с.
2. Клейменов В.А. Тепловая защита асинхронных электродвигателей / В.А.Клейменов // ВНИИЭМ. – М., 1966. – 68с.
3. Соркин М.Д. Способы защиты от аварийных режимов. Защитные устройства реагирующие на ток / М.Д. Соркин // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. – 2005. -№3 (33).
4. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты / Г.А. Бугаев, А.И. Леонтьев, Е.Ю. Ерохин [и др.] // Электромеханика. – 2001. - №2. - С.51-54.
5. Федоренко Г.М. Температурно-временные зависимости в системах контроля и диагностики электрических машин / Г.М. Федоренко // АН УССР. Институт электродинамики. – 1990. – №676. – 30с.
6. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мощинский, В.И. Цуканов // Электричество. - 2003. - №4. – С.20 – 26.
7. Сивокобыленко В.Ф. Контроль нагрева асинхронного электродвигателя по данным измерений параметров текущего режима. Диагностика элементов и узлов электротехнических систем / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Донецкий национальный технический университет. – 2008. – С.544 – 546.

Надійшла до редколегії 24.10.2010

Рецензент: М.М. Федоров

Ан.А. ГУСАРОВ, Ал.А. ГУСАРОВ, Е.Б. КОВАЛЕВ
Донецький національний технічний університет

An. GUSAROV, Al. GUSAROV, E. KOVALYOV
Donetsk National Technical University

Аналіз сучасних систем температурних захистів асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором. Проведено аналіз сучасних систем температурного захисту асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором.

The Analysis of Modern Thermal Protection of Asynchronous Motors with a Short-Circuit Rotor. The analysis of modern thermal protection of asynchronous motors with short-circuited rotors is carried out.