

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.51:621.313

А.В. Герасимук, М.В. Кипервассер, Е.Н. Топильская

Сибирский государственный индустриальный университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ СИСТЕМЫ
ОХЛАЖДЕНИЯ**

Высоковольтные синхронные электродвигатели широко используются в горно-металлургических кластерах промышленности различных регионов. Примерами применения таких двигателей являются турбокомпрессорные установки, подъемные машины, прокатные станы. Известно, что достоинствами этих двигателей являются высокий (96 – 98 %) КПД (особенно двигатели большой мощности) и возможность регулирования коэффициента мощности под нагрузкой.

Для обеспечения контроля аварийных режимов высоковольтные электродвигатели снабжаются комплексом стандартных релейных защит [1]:

- токовая отсечка (ТО);
- дифференциальная защита (ДЗТ);
- защита от замыканий на землю (ОЗЗ);
- защита минимального напряжения (ЗМН);
- от потери питания;
- от неполнофазного режима работы;
- от длительных перегрузок;
- от асинхронного хода;
- от колебаний нагрузки.

В процессе работы производится контроль электрических параметров, а также контроль температуры обмоток и магнитопровода, вибраций, мониторинг работы системы охлаждения электрической машины [2].

Известны случаи, когда выход из строя системы охлаждения электродвигателя приводит к его сильному перегреву. Такое явление сопровождается разрушением изоляции обмоток статора, возникновением вследствие этого внутренних межвитковых коротких замыканий, замыканий фазных обмоток между собой и на корпус машины. Восстановление работоспособности машины после указанных событий возможно только путем проведения сложного и дорогостоящего ремонта. При этом ни одна из перечисленных выше стандартных релейных защит не выявляет описанную аварийную ситуацию и не защищает машину от разрушения изоляции обмоток. Существуют спе-

циализированные виды защиты для контроля теплового состояния машины. Согласно пунктам правил устройства электроустановок на электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту: воздействие на сигнал и/или отключение электродвигателя при повышении температуры или прекращении действия вентиляции. Электродвигатели с водяным охлаждением обмоток и активной стали статора, а также с встроенными воздухоохладителями, охлаждаемыми водой, должны иметь защиту, действующую на сигнал при уменьшении потока воды ниже заданного значения и на отключение электродвигателя при его прекращении [3]. Однако, как показывает практика, имеют место случаи, когда такие защиты не срабатывают из-за неисправности датчиков или неработоспособности данных защит в силу различных других причин.

В настоящей работе рассматривается методика расчета допустимого времени работы синхронного двигателя при полном отключении системы охлаждения (СО), необходимого для принятия решения по отключению его от питающей сети или перезапуску СО. При выводе формул не учитывали передачу тепла от двигателя фундаментной плите, так как теплопроводность бетона невелика и площадь пятна контакта двигателя с плитой значительно меньше общей площади поверхности машины.

В качестве примера рассмотрен двигатель СТД (СТДП)-10000 номинальной электрической мощностью $P_{\Sigma} = 10$ МВт, КПД = 97,7 % [1].

Как известно, не вся электрическая мощность P_{Σ} , подводимая к электродвигателю, вследствие наличия активного сопротивления обмоток статора и ротора, сил трения в подшипниках, потерь в магнитопроводе из-за гистерезиса и вихревых токов преобразуется в механическую мощность P_M ; часть мощности, которая теряется из-за указанных причин, преобразуется в тепловую мощность ΔP (тепло-

вые потери). Эти потери учитываются при расчете КПД двигателя [4]:

$$\eta = P_{\Sigma} / P_M.$$

Тепловая мощность, генерируемая в процессе работы, определяется по следующей формуле:

$$\Delta P = P_{\Sigma} - \eta P_{\Sigma} = P_{\Sigma} (1 - \eta) = 10000(1 - 0,977) = 230 \text{ кВт}.$$

В нормальном режиме работы тепловая энергия ΔP отводится системой охлаждения от электродвигателя во внешнюю среду, не позволяя обмоткам статора и ротора разогреться до недопустимых температур. Для двигателя СТД (СТДП)-10000 максимальная допустимая температура обмоток и магнитопровода ($t_{\text{доп}}$) составляет 120 – 130 °С [5].

Установившаяся температура нагрева двигателя может быть определена по формуле

$$t_y = \Delta P \frac{1}{\alpha F} = 230 \frac{1}{8 \cdot 33,464} = 859 \text{ К} = 586 \text{ °С}, \quad (1)$$

где $F = 33,464 \text{ м}^2$ – площадь поверхности охлаждения (кожуха) двигателя; $\alpha = 8 \text{ Вт/(К} \cdot \text{м}^2)$ – коэффициент теплоотдачи поверхностью стального кожуха двигателя в воздушную среду.

Следует уточнить, что максимальная возможная температура нагрева – величина теоретическая. В реальности нагрев до такой температуры невозможен, так как термическая стойкость изоляции, определяемая классом нагревостойкости, обычно допускает нагрев максимум лишь до 220 °С. При значительном превышении этой температуры изоляция начнет разрушаться и, как следствие, разовьется внутреннее повреждение электродвигателя, после этого двигатель будет отключен средствами ДЗТ (при условии, что ДЗТ сохранила свою работоспособность при перегреве).

Кожух двигателя СТД-10000 представляет собой полуцилиндр, площадь его поверхности вычисляется как сумма полусуммы площади боковой поверхности и двух поверхностей его торцов и плоской стороны:

$$\begin{aligned} F &= [2\pi Rl + 2\pi R^2 / 2] / 2 + 2Rl = \pi(Rl + R^2 / 2) + \\ &+ 2Rl = \pi(1,7 \cdot 3,31 + 1,7^2 / 2) + 2 \cdot 1,7 \cdot 3,31 = \\ &= 33,464 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

где $R = 1,7 \text{ м}$ – радиус кожуха; $l = 3,31 \text{ м}$ – длина кожуха.

В формуле (1) не учитываются тепловые потери излучением с поверхности кожуха машины. Мощность потерь тепла излучением при установившейся температуре находится по уравнению Стефана-Больцмана:

$$\Delta P_{\text{лч}} = 4,8 \cdot 10^{-8} (t_y^4 - t_c^4) F,$$

где $t_c = 293 \text{ К}$ – температура окружающей среды.

Преобразуем формулу (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} t_k &= (\Delta P - \Delta P_{\text{из}}) \frac{1}{\alpha F} = \\ &= \left[\Delta P - 4,8 \cdot 10^{-8} (t_y^4 - t_c^4) F \right] \frac{1}{\alpha F} \end{aligned}$$

После раскрытия скобок и приведения этого уравнения к стандартному виду получим уравнение четвертой степени относительно t_y :

$$-4,8 \cdot 10^{-8} t_y^4 F - \alpha F t_y + \Delta P + 4,8 \cdot 10^{-8} t_c^4 F = 0. \quad (2)$$

В результате решения уравнения (2) по методу Феррари значение установившейся температуры (t_y) составляет 508 К = 235 °С.

Для расчета времени нагрева (τ) электродвигателя до максимально допустимой температуры ($t_{\text{доп}}$) воспользуемся известной формулой работы [4]:

$$\tau = T \ln \frac{t_y - t_c}{t_y - t_{\text{доп}}} = 30 \ln \frac{224 - 20}{224 - 130} = 21,5 \text{ мин},$$

где $T = 30 \text{ мин}$ – постоянная времени нагрева двигателя [6].

В нормальном режиме работы мощного синхронного двигателя отключение системы охлаждения является серьезной проблемой и необходимо принимать срочные меры либо по быстрому перезапуску системы охлаждения, если это возможно, либо отключать двигатель от сети.

При неполнофазном режиме работы электродвигателя ток в каждой из двух рабочих фаз возрастает от 1,6 до 2,5 раз [1]. Согласно известному выражению тепловыделение в обмотках статора в таком режиме возрастет пропорционально квадрату тока:

$$\Delta P = I_H^2 R,$$

здесь I_n – номинальный ток статора синхронного двигателя, А; R – активное сопротивление обмотки статора, Ом.

Для упрощения анализа режима примем, что вся тепловая мощность генерируется в обмотках статора; тогда можно записать равенство

$$\Delta P = I_n^2 R = 230 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Так как соединения обмоток двигателя СТД (СТДП)-1600 выполнены звездой, то при потере одной фазы питания одна фазная обмотка окажется отключенной от сети, то есть тепловая мощность будет генерироваться только двумя работающими фазами. С учетом вышеизложенного выражения (3) и кратности тока в работающих фазах при неполнофазном режиме получим:

$$\Delta P' = \frac{2}{3} (2,5 I_n)^2 R = \frac{2}{3} 6,25 I_n^2 R = 4,16 \Delta P = 958 \text{ кВт.}$$

При пересчете параметров нагрева при одновременном отключении системы охлаждения и возникновении неполнофазного режима работы электродвигателя установившаяся температура (t'_k) составит $823 \text{ К} = 550 \text{ }^\circ\text{С}$.

Время нагрева обмоток статора до максимально допустимой температуры составит

$$\tau = 30 \ln \frac{550 - 20}{550 - 130} = 7 \text{ мин.}$$

Таким образом, в ситуации, когда двигатель теряет одну из фаз питания, нагрев происходит значительно быстрее [7].

Функцию резервной защиты от неполнофазного режима выполняет, как правило, защита от токовой перегрузки (в случае отсутствия специализированной защиты от неполнофазного режима – защита от токовой перегрузки является основной). Ее уставки следует принимать не более расчетного времени нагрева электродвигателя до максимально допустимой температуры с учетом возможной технологической перегрузки (или времени пуска двигателя):

$$\tau_{\text{тп}} < \tau_{\text{п}} < \tau,$$

где $\tau_{\text{п}}$ – уставка времени защиты от перегрузки по току, с; $\tau_{\text{тп}}$ – продолжительность возможной технологической перегрузки электродвигателя, с.

Выводы. На основании проведенных расчетов можно заключить, что внезапное отключение системы охлаждения мощного синхронного двигателя является серьезной проблемой, в особенности, если это сопряжено с возникновением неполнофазного режима, так как это приводит к увеличению фазных токов и, как следствие, к быстрому разогреву двигателя до недопустимых температур. В ситуации, когда релейные защиты не отключают двигатель по каким-либо причинам, дежурный персонал должен произвести отключение двигателя не позднее истечения расчетного времени нагрева до максимально допустимой температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Релейная защита электродвигателей напряжением 6 – 10 кВ терминалами БМРЗ: методика расчета / С.А. Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьев. – СПб.: ПЭИПК, 2013. – 60 с.
2. Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование переходного процесса в цепи тока приводного электродвигателя при аварии турбокомпрессора // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 2 (12). С. 45 – 48.
3. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. – М.: Эксмо, 2012. – 752 с.
4. Костенко М.П., Пятровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
5. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
6. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2: Учебник для электротехн. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1979. – 304 с.
7. Филлипов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.

© 2016г. А.В. Герасимук,
М.В. Кипервассер, Е.И. Топильская.
Поступила 26 мая 2016 г.