

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИДЕНТИФИКАТОР УГЛА НАГРУЗКИ ПРИВОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Высокие энергетические показатели и конструктивные преимущества синхронных двигателей (СД) обуславливают их широкое применение в мощных электроприводах, работающих в продолжительном режиме *SI* и не требующих глубокого регулирования скорости [1-4]. В современной промышленности и, особенно, в энергетических отраслях синхронные машины длительно и эффективно работают в приводах компрессоров, дутьевых вентиляторов, буровых установок, насосов, прокатных станков и прочих ответственных механизмах. Так, например, суммарная установленная мощность синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) магистрального транспорта газа составляет более 6000 МВт или 18 % от общей установленной мощности Единой газотранспортной системы России [1]. График их нагрузки может длительное время оставаться постоянным, а момент на валу двигателя изменяется незначительно и весьма плавно в зависимости от сезонного потребления газа, колебаний температуры окружающего воздуха или перехода на другие графики газоподачи.

Повышение эффективности и надежности работы СД ЭГПА достигается решением следующих задач [2,5]:

- увеличением перегрузочной способности и повышением устойчивости СД при набросе нагрузки или колебаниях напряжения в сети,
- демпфированием механических колебаний ротора,
- обеспечением минимальных потерь в двигателе и питающей сети,
- уменьшением колебаний мощности и напряжения в питающей сети.

Приоритетным решением данных задач является разработка новой «интеллектуальной» САР возбуждения СД с законами управления, соответствующими детерминированной или стохастической нагрузке ЭГПА.

Для СД с постоянной или медленно изменяющейся нагрузкой задание на ток возбуждения формируется в соответствии с векторной диаграммой статического режима СД в зависимости от нагрузки на валу двигателя и напряжения питающей сети. При этом автоматический регулятор возбуждения (АРВ) настраивается на поддержание постоянства реактивной мощности СД. Однако такой регулятор не обеспечивает устойчивую работу при быстро меняющихся нагрузках, что вызывает значительные качания ротора особенно при запуске ЭГПА [6].

Устойчивость и надежность СД, рациональное использование машины и эффективность технологического процесса во многом определяются структурой системы АРВ и ее быстродействием. Существующие системы АРВ стабилизируют ток возбуждения и реактивный ток с коррекцией по напряжению сети в статике. Поэтому актуальным является улучшение динамики СД при возмущениях по нагрузке или напряжению.

Наиболее совершенным информационным параметром, однозначно определяющим момент выхода СД из синхронизма, является угол нагрузки  $\delta$  [6,7]. Система АРВ должна обеспечивать устойчивую работу СД в динамике при минимуме колебаний мощности, демпфировать качания ротора и активного тока статора, ограничивать максимальное отклонение угла нагрузки  $\delta$  СД, снижать влияние на сеть и минимизировать потери.

С точки зрения повышения динамической устойчивости и эффективного гашения качаний ротора СД ЭГПА наиболее совершенной признана САР возбуждения, которая работает в функции угла нагрузки  $\delta$  ротора двигателя и его производной [7-9]. При этом информация о мгновенном значении угла нагрузки  $\delta$  позволяет прогнозировать момент выпадения СД из синхронизма и своевременно форсировать возбуждение, предотвращая асинхронный ход. Однако непосредственное измерение угла  $\delta$  с использованием магнитоэлектрических или вращающихся датчиков положения ротора требует серьезного вмешательства в конструкцию СД, что повышает стоимость ЭГПА и снижает его эксплуатационную надежность.

Наиболее приемлемым решением является использование методов косвенного определения  $\delta$  с помощью микропроцессорного идентификатора, вычисляющего  $\delta$  с малой динамической погрешностью. Такой «интеллектуальный» датчик может быть нечувствителен к разбросу параметров электромагнитной цепи СД и надежен в длительной эксплуатации.

Поскольку начальное значение потокосцепления обмотки возбуждения  $\Psi_f(0)$  известно из уравнений установившегося режима работы СД, то потокосцепление  $\Psi_f$  в переходном режиме определяется по напряжению возбуждения  $U_f$  и току возбуждения  $I_f$ . Потокосцепление обмотки возбуждения и потокосцепление статора СД  $\Psi_{sd}$  по продольной оси связаны с токами в контурах машины и индуктивностями рассеяния статора и обмотки возбуждения. Продольный ток статора  $i_{sd}$  может быть определен лишь при известных значениях  $\delta$ , активного и реактивного тока статора. Если ток  $i_{sx}$  соответствует реактивному току статора и ориентирован вдоль вектора потокосцепления статора  $\Psi_s = (\Psi_{sd} + j\Psi_{sq})$ , а ток  $i_{sy}$  соответствует активному току статора и совпадает с вектором напряжения статора  $U_s = (U_{sd} + jU_{sq})$ , то  $\delta$  является углом сдвига между координатными осями  $dq$ .

Для вычисления угла нагрузки по аналитическим формулам напряжение статора  $U_s$  и ток возбуждения  $i_f$  измеряются непосредственно, а потокосцепление  $\Psi_f$  вычисляется косвенно, активный  $i_{sy}$  и реактивный  $i_{sx}$  токи

статора – через фазные токи и напряжения в физических координатах.

Разработана математическая модель СД на базе уравнений реализации АРВ с идентификатором  $\delta$ . Входные переменные модели – продольный  $i_{sd}$ , поперечный  $i_{sq}$  токи статора и ток возбуждения  $i_f$ , выходные переменные – электромагнитный момент  $M$ , активная мощность  $P$  и потокосцепление статора  $\psi_s$ . Блочнo учитываются в модели демпферные контура СД по продольной и поперечной осям. АРВ позволяет стабилизировать реактивную мощность  $Q$ , напряжение статора  $u_s$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

Регулятор тока возбуждения САР СД обеспечивает требуемое быстродействие в контуре регулирования  $i_f$ . Регулятор реактивного тока (реактивной мощности) необходим для обеспечения энергоэкономичного режима работы двигателя. В тех случаях, когда узел нагрузки не испытывает дефицита реактивной мощности, оптимальным является режим работы СД с  $\cos \varphi \rightarrow 0,9$ , не связанный с потреблением реактивной мощности и обеспечивающий минимум потерь и благоприятный тепловой режим двигателя.

Блок демпфирования колебаний ротора СД служит для ограничения амплитуды колебаний ротора, снижения колебаний активной и реактивной мощности СД. Тем самым повышается устойчивость и надежность работы двигателя при ударном приложении нагрузки. Регулирование тока возбуждения в целях демпфирования качаний ротора осуществляется по углу нагрузки  $\delta$  и его производной, которые являются параметрами, непосредственно определяющими устойчивость двигателя. Угол нагрузки  $\delta$  и его производная вычисляются идентификатором в трехконтурной САР.

В предлагаемой системе АРВ обеспечивается минимум отклонения от заданного закона регулирования при сложном характере изменения нагрузки на валу СД в широких пределах. Идентификатор угла  $\delta$  вычисляет значение угла нагрузки по легко измеряемым координатам (току  $i_f$  и напряжению  $u_f$  цепи возбуждения, активному и реактивному токам и напряжению статора). Для вычисления  $\delta$  напряжение статора  $u_s$  и ток возбуждения  $i_f$  измеряются непосредственно, а потокосцепление  $\psi_f$  вычисляется в соответствии с математической моделью. Активный  $i_{sy}$  и реактивный  $i_{sx}$  токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах. Таким образом, для косвенного измерения  $\delta$  используются сигналы датчиков тока возбуждения, напряжения возбуждения, а также тока и напряжения статора. При выборе элементной базы информационной части АРВ следует ориентироваться на ПЛК, применение которых не только повышает надежность системы в целом, но и снижает затраты на ее проектирование, изготовление, наладку и возможный ремонт.

Разработанная система АРВ позволяет стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности, напряжение на статоре СД. Идентификатор позволяет вычислять угол  $\delta$  как в статических, так и в динамических режимах работы СД, благодаря чему возможна своевременная форсировка возбуждения, предупреждающая переход двигателя в асинхронный режим.

Разработанные модели СД, системы АРВ и идентификатора  $\delta$  позволяют производить математическое моделирование динамических режимов системы АРВ – СД. Полученные графики переходных процессов подтверждают работоспособность системы АРВ и идентификатора  $\delta$  и свидетельствуют о незначительных отклонениях реактивного тока СД от заданного значения при снижении колебаний активного тока статора [1,9], что подтверждает предположение об адекватности и приемлемой точности работы микропроцессорного идентификатора в динамических режимах СД.

#### Список использованной литературы

1. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Спиридович Е.А. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: Монография // Под ред. О.В. Крюкова. – Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010.
2. Аникин Д.А., Рубцова И.И., Крюков О.В. и др. Проектирование систем управления электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Газовая промышленность, 2009, №2. – С.44-47.
3. Крюков О.В. Проектирование и модернизация электроприводов нефтегазовых перекачивающих агрегатов // III ВНТК «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий», Уфа, 2011. – С.69-72.
4. Степанов С.Е. Особенности пуска синхронных двигателей большой мощности // Тезисы XVI НТК «Проблемы развития газовой промышленности Сибири», Тюмень, 17-21 мая 2010. – С.189-190.
5. Рубцова И.Е., Крюков О.В., Степанов С.Е. Теоретическое обоснование и новые аппаратные возможности энергосберегающих ЭГПА // Тезисы доклада IV МНТК «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2011), ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 26-27 октября 2011. – С.112.
6. Степанов С.Е. Разработка САР возбуждения с идентификатором угла нагрузки для СД // Приводная техника, 2010, №2. – С.17-23.
7. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций // Автоматизация в промышленности, 2010, №6. – С.29-31.
8. Крюков О.В., Степанов С.Е. Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент на ПМ №107427, МПК H02P 27/04, 25/02. - ОАО «Гипрогазцентр». – Оpubл. 10.08.2011.
9. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Анализ системы возбуждения синхронного двигателя с косвенным измерением угла нагрузки // МНТК «XVI Бенардосовские чтения», Иваново, 1-3 июня 2011. Т.3. – С.44-47.