

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

С.Е. Степанов, О.В. Крюков, А.С. Плехов (ОАО "Гипрогазцентр")

Рассмотрены вопросы модернизации и проектирования современных САУ электроприводными газоперекачивающими агрегатами. Представлены инновационные результаты анализа и синтеза САУ возбуждением синхронных машин с микропроцессорным идентификатором угла нагрузки.

Ключевые слова: электроприводные газоперекачивающие агрегаты, САУ возбуждением синхронных машин, микропроцессорный идентификатор угла нагрузки.

Благодаря высоким энергетическим показателям и конструктивным особенностям синхронные двигатели (СД) находят широкое применение в мощных электроприводах, работающих в продолжительном режиме S1 и не требующих глубокого регулирования скорости. В современной отечественной и зарубежной промышленности и, особенно, в энергетических отраслях синхронные машины длительно и эффективно работают в качестве электроприводов дутьевых вентиляторов, воздуходувок, буровых установок, компрессоров, насосов, шаровых мельниц, прокатных станов и прочих ответственных механизмов. Так, например, суммарная установленная мощность синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) магистрального транспорта газа составляет >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.

Большинство ЭГПА в настоящее время отработали свой нормативный срок (>15 лет), и для обеспечения надежного транспорта природного газа важнейшей задачей является модернизация существующего парка электроприводных агрегатов с применением современных технических решений, которые проводятся в двух направлениях: переход аппаратных средств на современную элементную базу; совершенствование законов регулирования и структур систем регулирования и возбуждения СД.

Таким образом, повышение эффективности и надежности работы СД ЭГПА достигается решением следующих задач [2]:

- увеличение перегрузочной способности и повышение устойчивости СД при набросе нагрузки или колебаниях напряжения в сети;
- демпфирование механических колебаний ротора;
- обеспечение минимальных потерь в двигателе и питающей сети;
- уменьшение колебаний активной, реактивной мощности и напряжения в питающей сети.

Поскольку одновременное решение всех указанных задач затруднительно из-за наличия единствен-

ного канала управляющего воздействия через систему возбуждения СД, закон управления током возбуждения выбирается в соответствии с детерминированным или стохастическим характером нагрузки 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 или коэффициента мощности СД. Однако такой регулятор не позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при быстро меняющихся нагрузках, которые вызывают значительные качания ротора СД в динамических режимах, включая запуск ЭГПА.

Устойчивость и надежность синхронного электропривода, рациональное использование СД и эффективность ТП во многом определяются структурой системы АРВ и ее быстродействием. Существующие системы АРВ поддерживают на заданном уровне ток возбуждения и реактивный ток с коррекцией по напряжению сети, но не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к работе СД в динамических режимах. Поэтому актуальной является задача улучшения динамических характеристик СД в условиях действия возмущений в виде изменения момента нагрузки или напряжения статора.

Модель управляемого СД ЭГПА

Наиболее совершенным информативным параметром, однозначно определяющим момент выхода двигателя из синхронизма, является угол нагрузки δ . Система АРВ с улучшенными динамическими характеристиками должна обеспечивать устойчивую работу СД в переходных режимах при минимуме колебаний активной и реактивной мощности, демпфировать качания ротора и активного тока статора, ограничивать максимальное отклонение угла нагрузки δ СД, снижать отрицательное влияние двигателя на питающую сеть, минимизировать потери электрической энергии в системе электропривода.

Повышение надежности работы СД тесно связано с управлением возбуждением в аварийных и предаварийных режимах. В существующих возбудителях момент выпадения двигателя из синхронизма выявляется по факту появления периодической со-

Когда теория совпадает с экспериментом, это уже не открытие, а закрытие.

П. Л. Капица

ставляющей в токе возбуждения. Срабатывание защиты зависит от соотношения периодической и постоянной составляющих в токе возбуждения, что не всегда позволяет выявить момент выпадения двигателя из синхронизма. При малых же токах возбуждения защита может срабатывать и в синхронных режимах работы СД под действием кратковременных возмущений.

С точки зрения повышения динамической устойчивости и эффективного гашения качаний ротора СД ЭГПА наиболее совершенной признана система автоматического регулирования возбуждения, которая работает в функции угла нагрузки ротора двигателя и его производной [3]. При этом информация о мгновенном значении угла нагрузки позволяет прогнозировать момент выпадения СД из синхронизма и своевременно форсировать возбуждение, предотвращая асинхронный ход двигателя. Демпфирование колебаний ротора осуществляется посредством форсировок возбуждения в соответствии со значением скорости изменения угла нагрузки.

Однако непосредственное измерение угла нагрузки δ с использованием магнитоэлектрических или вращающихся датчиков положения ротора требует серьезного вмешательства в конструкцию двигателя, что повышает стоимость ЭГПА и снижает его эксплуатационную надежность.

Наиболее приемлемым с практической точки зрения вариантом решения данной задачи является использование методов косвенного определения угла нагрузки δ с помощью микропроцессорного идентификатора параметров СД, вычисляющего δ с малой динамической погрешностью без использования датчиков внутри или на валу двигателя. Такой идентификатор 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, соответствующих установившемуся режиму работы СД, то потокосцепление Ψ_f в переходном режиме определяется по напряжению возбуждения U_f и току возбуждения I_f .

Потокосцепление обмотки возбуждения и потокосцепление статора СД Ψ_{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 угла нагрузки δ , 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 угол

нагрузки δ 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 Ψ_f вычисляется косвенно. Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах.

Особенности САР возбуждения СД

Назначение САР возбуждения СД заключается в поддержании тока возбуждения i_f и составляющих тока статора i_{sd} , i_{sq} , необходимых для обеспечения требуемого электромагнитного состояния СД при изменениях момента нагрузки или напряжения статора. АРВ позволяет стабилизировать один из следующих параметров: реактивную мощность Q , напряжение статора u_s , коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Регулятор тока возбуждения (РТВ) САР СД компенсирует постоянную времени обмотки возбуждения и обеспечивает требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения. 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 $\cos \varphi$ близким к 0,9, не связанный с потреблением реактивной мощности из сети и обеспечивающий минимум электрических потерь и благоприятный тепловой режим двигателя. Регулятор напряжения обеспечивает стабилизацию напряжения в узле нагрузки путем изменения величины реактивной мощности, потребляемой или генерируемой двигателем в сеть.

Блок демпфирования колебаний ротора СД предназначен 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 и его производной, которые являются параметрами, непосредственно определяющими устойчивость двигателя. Угол нагрузки φ и его производная вычисляются идентификатором угла нагрузки в трехконтурной САР возбуждением СД.

Для обеспечения оптимального качества переходного процесса (колебательность активного и реактивного тока статора, амплитуда качаний ротора, длительность переходного процесса) при резких изменениях электромагнитной мощности $P_{эм}$ необходимо в динамике поддерживать заданный режим Q^* . В предлагаемой системе АРВ обеспечивается минимум отклонения от заданного закона регулирования при сложном характере изменения нагрузки на валу СД в широких пределах.

Формирование заданий для потокосцеплений Ψ_{sd}^* , Ψ_{sq}^* (блок Ψ_s) происходит с учетом структурных свойств двигателя как объекта регулирования. Задания Ψ_{sd}^* , Ψ_{sq}^* подчинены заданиям токов i_{sd}^* , i_{sq}^* , вычисляемым в блоке I_s , и заданию для потокосцепления Ψ_s^* . Последнее формируется пропорциональным регулятором напряжения (РН) или определяется напряжением статора. Входными переменными блока I_s являются активная мощность P и реактивная мощность Q статора СД; выходными — токи i_{sd}^* , i_{sq}^* , $i_{sd}Q$. Задание на ток возбуждения i_f^* и сигнал ошибки на входе ПИ-регулятора тока возбуждения вычисляются в блоке I_f . Электромагнитная инерция цепи возбуждения характеризуется переходной постоянной времени. Компенсировать постоянную времени обмотки возбуждения и обеспечить требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения позволяет ПИ-регулятор, параметры которого определяются в результате оптимизации дифференциального уравнения для цепи возбуждения.

Микропроцессорный идентификатор угла нагрузки СД

Идентификатор угла δ должен вычислять значение угла нагрузки по легко измеряемым координатам СД (току i_f и напряжению u_f цепи возбуждения, активному и реактивному токам и напряжению статора). Для вычисления угла нагрузки напряжение статора u_s и ток возбуждения i_f измеряются непосредственно, а потокосцепление Ψ_f вычисляется в соответствии с математической моделью. Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжение статора в физических координатах. Таким образом, для косвенного измерения угла нагрузки используются сигналы датчика тока возбуждения ДТР, датчика напряжения возбуждения ДНР, датчика тока ДТС и напряжения ДНС 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 угла нагрузки СД позволяет вычислять угол δ как в статических, так и в динамических режимах работы СД, благодаря чему возможно обеспечение своевременной форсировки возбуждения, предупреждающей переход двигателя в асинхронный режим.

Разработанные модели СД, системы АРВ и идентификатора угла нагрузки двигателя позволяют производить математическое моделирование динамических режимов системы АРВ — СД на ПК. Полученные с помощью моделирования на ПК графики переходных процессов подтверждают работоспособность системы АРВ и идентификатора угла нагрузки.

Для проверки работоспособности идентификатора угла нагрузки разработана модель СД с идентификатором угла нагрузки и его производной для ПК. При моделировании было введено допущение, что параметры схемы замещения СД известны точно и являются неизменными, а помеха на входе интегратора отсутствует. В результате моделирования работы идентификатора при сбросе и набросе нагрузки СД получены графики потокосцепления обмотки возбуждения Ψ_f и угла нагрузки δ СД, а также изменения скольжения ротора s (производной угла нагрузки).

Графики переходных процессов в системе АРВ-СД свидетельствуют о незначительных отклонениях реактивного тока СД от заданного значения при снижении колебаний активного тока статора, что подтверждает предположение об адекватности и приемлемой точности работы идентификатора в динамических режимах работы СД.

Результаты моделирования на ПК свидетельствуют о высокой точности разработанной САР и алгоритмов косвенного измерения угла нагрузки по токам и напряжениям в статорных контурах СД и в его обмотке возбуждения без использования дорогостоящих датчиков, размещенных внутри и на валу синхронного электродвигателя.

Выводы

1. В рамках модернизации систем АРВ СД ЭГПА разработаны модели СД и структурные схемы АРВ и микропроцессорного идентификатора угла нагрузки машины.

2. Разработанная система АРВ позволяет стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности и напряжение на статоре СД. Идентификатор угла нагрузки СД позволяет вычислять угол δ как в статических, так и в динамических режимах работы СД, благодаря чему возможно обеспечение своевременной форсировки возбуждения, предупреждающей переход двигателя в асинхронный режим.

3. Математическое моделирование динамических режимов системы АРВ-СД на ПК подтвердило адекватность косвенного вычисления угла нагрузки СД с приемлемой точностью.

Список литературы

1. Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы электрооборудования и автоматизации для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. 2008. №6.
2. Аникин Д.А., Рубцова И.И., Крюков О.В. Проектирование систем управления ЭГПА // Газовая промышленность. 2009. №2.
3. Титов В.Г., Крюков О.В., Степанов С.Е. Инновационные алгоритмы регулирования возбуждения синхронных двигателей // Матер. XIII МНТК "Информационные системы и технологии" (ИСТ-2010). Н.Новгород. 2010.

Степанов Сергей Евгеньевич — инженер-проектировщик,

Крюков Олег Викторович — канд. техн. наук, главный специалист ОАО "Тупрогазцентр",

Плехов Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Контактный телефон (831) 428-25-84. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru