

В. Г. СЫЧЕНКО (Днепропетровский орган сертификации ж.-д. транспорта),
М. П. БАДЕР (Московский государственный университет путей сообщения),
В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ)

ПРОГРАММНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Проанализовано критеріи якості регулювання напруги на шинах тягової підстанції та запропоновано субоптимальний адаптивний алгоритм регулювання напруги. Розроблена для ділянки залізниці з електротягою постійного струму методика програмного регулювання дозволяє зменшити експлуатаційні витрати і не потребує значних витрат на її впровадження.

Проанализированы критерии качества регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции и предложен субоптимальный адаптивный алгоритм регулирования напряжения. Разработанная для участка железной дороги с электротягой постоянного тока методика регулирования напряжения позволяет добиться снижения эксплуатационных расходов и не требует значительных затрат на ее внедрение.

The criteria of voltage regulating quality on tractive power supply substation buses have been analyzed and the suboptimum adaptive algorithm of voltage regulation has been proposed. The method developed for a DC-electrified railway section allows reducing maintenance costs and does not require significant expenses for its implementation.

Введение

Программой энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины предусматривается широкое использование энергооптимальных технологий в перевозочном процессе. Для реализации этого необходим комплексный системный подход, предусматривающий разработку и совершенствование технических и организационных мер по оптимизации параметров системы тягового электроснабжения, режимов ее работы, а также стимулирования рационального энергопотребления.

Для уменьшения эксплуатационных расходов на железнодорожном транспорте широко применяются технологические мероприятия, основанные на формировании графика движения поездов с учетом многотарифности оплаты за электроэнергию в течение суток.

Уменьшение энергопотребления возможно путем улучшения качества электрической энергии и внедрения рациональных режимов ведения поездов.

Критериями качества электрической энергии в тяговых сетях являются отклонение и колебания напряжения, а также несинусоидальность его для электротяги переменного тока [1]. Изменение уровня напряжения в тяговой сети влияет на коэффициент полезного действия электроподвижного состава. Помимо этого, вследствие увеличения разности в напряжениях на шинах смежных подстанций, возникают значительные

уравнительные токи, перетекающие между подстанциями, что приводит к значительному увеличению потерь электроэнергии.

Одним из важнейших направлений повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения и снижения потерь электроэнергии является применение регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций. На тяговых подстанциях постоянного тока применяются регуляторы пределов напряжения (РПН) на основе трансформаторов, обмотки которых выполнены с ответвлениями, коммутируемыми специальными переключателями без разрыва цепи тока [1]. Регулирование напряжения при этом осуществляется ступенчато, а ресурс переключений напряжения ограничен (до 11 тысяч переключений). Однако внедрение такой системы затруднено вследствие устаревшего оборудования тяговых подстанций, отсутствия регулирующих устройств. Системы бесконтактного регулирования напряжением не получили широкого распространения.

Цели и задачи исследования

Таким образом, решение задачи снижения энергопотребления за счет повышения качества напряжения на тяговых подстанциях, оборудованных РПН со ступенчатым регулированием напряжения, связано, главным образом, с разработкой рациональных алгоритмов управления регуляторами с учетом ограниченного ресурса их работы.

В соответствии с вышеизложенным, целью настоящей работы является анализ критериев качества регулирования напряжения и разработка субоптимального адаптивного алгоритма регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции.

Анализ критериев качества регулирования напряжения на тяговой подстанции

Система тягового электроснабжения (СТЭС) с позиций технической кибернетики – это многомерный объект автоматического управления, характеризующийся стохастическим характером изменения параметров функционирования, переменными параметрами которого являются потенциалы в узлах, токи и соответственно потоки активной и реактивной энергии, протекающие по фидерам, а возмущениями – случайные изменения мощности нагрузки в узлах, вызванные изменениями количества, положения и режимов работы тяговых потребителей, изменением режимов работы нетяговых потребителей и т. д. Управляющими воздействиями являются формируемые по определенному алгоритму воздействия на РПН, приводящие к переключению отводов обмоток трансформатора и регулировке напряжения на шинах.

С учетом случайного характера возмущений, воздействующих на систему, изменение напряжения на шинах тяговой подстанции будет также случайной величиной. Параметром качества напряжения может служить среднее квадратическое отклонение напряжения от заданного среднего значения или дисперсия. Однако разработка алгоритма функционирования РПН со ступенчатым регулированием напряжения по критерию минимизации дисперсии напряжения на шинах подстанции не дает заметного снижения эксплуатационных расходов. Критерием решения задачи оптимизации регулирования напряжения переключения отводов обмотки трансформатора является минимизация функционала, учитывающего уменьшение расходов на перевозки, снижение потерь на протекание уравнительного тока между подстанциями, а также расходы на переключения РПН.

Адаптивный алгоритм регулирования напряжения

Необходимость создания энергооптимальной системы регулирования напряжения, позволяющей учитывать многообразие влияющих факторов, привела к разработке адаптивных субоптимальных алгоритмов регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции [2].

Адаптивные субоптимальные алгоритмы очень широко используются при построении систем управления и регулирования при неопределенности параметров или неполной факторизации критериев качества функционирования системы. Разработанные алгоритмы позволяют создать систему непрерывного следящего регулирования напряжения, адаптирующуюся к изменяющимся условиям токопотребления, то есть к изменению поездной ситуации. В силу этого, применяя к адаптивным алгоритмам регулирования напряжения принцип «достаточного управления», заключающийся в том, что на шинах тяговой подстанции поддерживается напряжение $U = f(I, \Delta t)$, «достаточное» для проследования поезда по межподстанционной зоне в соответствии с графиком движения.

Для каждого значения тока в контактном проводе, усредненного по уровню и длительности, расчетным путем можно подобрать энергооптимальный уровень напряжения с соблюдением всех вышеназванных ограничений. Таким образом, при пропуске одного поезда по межподстанционной зоне зависимость изменения напряжения на шинах тяговой подстанции от времени можно рассматривать с достаточной степенью точности как функцию только времени $U = f(t)$.

Алгоритм регулирования напряжения в соответствии с последним выражением, реализует программное управление или управление по разомкнутой схеме, которое широко используется в вероятностных задачах адаптивного управления нелинейными объектами и является одной из разновидностей субоптимальных стратегий управления. При этом происходит переход от параметрического закона управления к временному, что упрощает структуру регулятора.

Однако на межподстанционной зоне, как правило, находится несколько разнотипных поездов, оказывающих взаимное влияние на их тягово-энергетические характеристики. На имитационной модели (ИМ) эксплуатационной работы на участке тяговой сети можно получить зависимости $U(t)$ и $I(t)$ в течение определенного периода времени (например, суток) и реализовать управление напряжением на шинах тяговой подстанции по критерию обеспечения минимума расхода электроэнергии. Таким образом, описанный принцип программного управления по разомкнутой схеме может быть реализован для регулирования напряжения на шинах подстанции при пропуске по участку всех поездов, предусмотренных графиком поездной работы.

В соответствии с вышеизложенным разработан следующий алгоритм программного регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции:

- с помощью имитационной модели для участка тяговой сети находим зависимости токов подстанций от времени для заданного числа поездов;
- проводим усреднение токов по временным интервалам;
- для каждого значения тока и соответствующего временного интервала на имитационной модели с учетом ограничений определяем достаточный уровень напряжения на шинах подстанции при минимуме расхода электрической энергии на тягу поездов, то есть получаем закон регулирования $U(t)$ для каждой из подстанций;
- устройствами регулирования напряжения, имеющимися на данной подстанции, по заданному закону $U = f(t)$ осуществляем регулирование напряжения.

Рассмотрим некоторые аспекты практической реализации алгоритма программного регулирования напряжения.

СТЭС характеризуется сложным взаимодействием составляющих ее устройств, часть которых имеет нелинейные характеристики. Тяговые подстанции, тяговая сеть электроподвижной состав совместно с системой внешнего электроснабжения образуют протяженную многомерную динамическую систему, режим которой невозможно исследовать без учета случайных факторов, влияющих на ее состояние. Меняющиеся во времени условия работы устройств системы оказывают влияние на эффективность ее функционирования. Сложность задач практических расчетов и анализа работы системы электроснабжения электрифицированной железной дороги усугубляется тем, что ряд важнейших параметров устройств электроснабжения и показателей ее работы являются функционалами от переменных, соответствующих случайным процессам. Для исследования таких многомерных объектов управления, характеризующихся стохастическим характером функционирования, широко применяется имитационное моделирование, заключающееся в том, что математическая модель воспроизводит с помощью ЭВМ функционирование во времени системы. При этом отображаются элементарные явления, составляющие процесс, с со-

хранением их логической последовательности протекания во времени. В настоящее время для исследования режимов работы системы тягового электроснабжения разработан целый ряд моделей. Однако эти имитационные модели построены, в основном, для получения усредненных значений величин и не учитывают в полной мере разнообразие типов поездов, обращающихся на участке, а также изменение уровня напряжения на токоприемнике электровоза. Поскольку проведение экспериментальных измерений с регулированием уровней напряжения в тяговой сети затруднительно из-за невозможности воспроизведения на практике одинаковых показателей работы системы электроснабжения при изменении напряжения, исследование проведено на имитационной модели.

Общепринятым подходом к моделированию работы СТЭС является разделение ее на две подсистемы: динамическую, включающую моделирование движения поездов и, следовательно, нагрузок (вектор задающих токов или мощностей), и статическую, включающую электрический расчет для конкретной мгновенной поездной ситуации. Для решения задач энергоснабжения, где требуется получить средневзвешенные оценки электрических величин, например, потери энергии, обычно осуществляют моделирование с одним (средневзвешенным) типом поезда. При решении задачи энергооптимального регулирования напряжения в тяговой сети с целью получения оценки изменения напряжения на токоприемнике электровоза при его движении по перегону, необходимо вводить в модель все типы поездов (и электровозов), обращающихся на данном участке. Сложность модели при этом возрастает, а если учесть, что на каждом шаге счета для всех поездов, находящихся на участке, выполняется тяговый расчет, то и время счета увеличивается. Однако для получения наиболее близких к реальным оценкам электрических величин (в частности, токов и напряжений), при рассмотрении различных алгоритмов регулирования напряжения, а также с целью уменьшения времени обучения при построении адаптивной системы регулирования такой подход представляется правомерным.

Моделирование графика движения поездов представляет собой моделирование очередности отправления поездов различных типов и моделирование интервалов между ними с вероятностной точки зрения. Детальное рассмотрение данного вопроса выходит за рамки этой статьи. Здесь отметим, что в имитационной модели при расчете вероятностей применяется схема «выборка без возвращения», что больше

соответствует действительности, так как число отправляемых за расчетный период поездов различных типов всегда конечно, а также осуществляется учет всех типов поездов, обращающихся на участке.

Моделирование тяговой нагрузки осуществляется вектором задающих токов, то есть каждый электровоз заменяется функцией тока $J(s)$, определяемой из тягового расчета. Такой подход позволяет учесть реальные условия движения (профиль, влияние других поездов). Тяговые расчеты выполняются с учетом действительного напряжения на токоприемниках электровозов путем введения напряжения непосредственно в формулы расчета кривых движения. В результате расчета мгновенной схемы по значению напряжения на токоприемнике электровоза производится пересчет от действительной скорости, соответствующей данному напряжению, к скорости, соответствующей номинальному напряжению, и по аппроксимированным тяговым и токовым характеристикам электровоза для номинального напряжения определяется его сила тяги и ток для действительного напряжения.

Электрический расчет производится известными методами. Моделирование нагрузки районных потребителей осуществляется с помощью генератора случайных чисел. При этом учитывается, что районная нагрузка имеет постоянную и переменную составляющие. Моделирование же питающей энергосистемы, а вернее учет изменения напряжения на питающих шинах осуществляется моделированием изменения сопротивления энергосистемы.

Выбор временного интервала для усреднения тока, то есть, фактически, выбор количества управляющих воздействий, определяется для каждого конкретного участка с учетом возможностей и ресурса коммутирующей аппаратуры и количества пиков нагрузки. В этом ракурсе также представляет интерес переход на дифференцированные тарифы по оплате за электроэнергию на тягу поездов [3].

Расчет энергооптимального уровня напряжения на ИМ осуществляется на основе критерияльного подхода [4], основанного на том, что уровень напряжения рассматривается не как нормированный, наперед заданный показатель, а как параметр, оптимизирующий передачу энергии электроподвижному составу.

Предлагаемая методика программного управления режимом напряжения на шинах тяговой подстанции является упрощенной, однако наиболее приемлема по технико-экономическим сооб-

ражениям в современных условиях. Практическое использование предлагаемой методики предполагает изменение режимных карт ведения поезда по участку. При этом локомотивным бригадам фактически предлагаются условия ограниченного выбора режимов вождения, что нивелирует различную квалификацию машинистов и снижает влияние «субъективного фактора». Фактически речь идет о создании энергетического паспорта конкретного участка СТЭС, который увязывает весь комплекс железнодорожного транспорта, обеспечивающий перевозочный процесс.

Выводы

В работе проанализированы критерии качества регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции и предложен субоптимальный адаптивный алгоритм регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции.

Предложенная методика программного регулирования для реальных условий работы электрифицированного участка постоянного тока не требует больших затрат и позволяет добиться снижения эксплуатационных расходов и повышения экономичности работы. Расчеты, проведенные для участка Внуково – Малоярославец Московской железной дороги по исполненному графику движения поездов, показали возможность снижения электропотребления на тягу поездов до 3 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1. / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
2. Сыченко В. Г. Алгоритмы управления режимом напряжения на тяговых подстанциях постоянного тока. / Депон. рукопись № 329. – Ук. 99 от 13.12.99 г. – 16 с., ил.
3. Мамошин Р. Р. Снижение энергоемкости в системах электроснабжения электрической тяги. // Труды второй научн. технич. конференции: Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Кн. 1. – М.: МИИТ, 1999. – С. 1–6.
4. Сыченко В. Г. Выбор управляющего параметра при разработке микропроцессорной адаптивной системы регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции // Межвузовский сборник научных трудов / Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта. – Д.: Сич, 1999. – С. 166–172, ил.

Поступила в редколлегию 06.06.2005.