УДК: 621.332

Регулирование мощности установки поперечной компенсации на посту секционирования

Леонид ГЕРМАН
Leonid A. GERMAN

Константин КИШКУРНО
Constantine V. KISHKURNO

Герман Леонид Абрамович *– доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Нижний Новгород, Россия.*
Кишкурно Константин Вячеславович *– аспирант МИИТ, Москва, Россия.*

Сложность регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирования контактной сети переменного тока имеет свои причины и последствия, которые связаны в том числе и с неполнотой информации о тяговой нагрузке. Предложено оценивать степень загрузки тяговой сети и, следовательно, управлять компенсационной установкой по падению напряжения между тяговой подстанцией и постом секционирования. Рассмотрена возможность повышения точности регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации путем передачи данных по напряжению шин 27,5 кВ тяговых подстанций.

Ключевые слова: контактная сеть, железная дорога, тяговое электроснабжение, поперечная компенсация, пост секционирования, реактивная мощность, потери напряжения, алгоритм.

Регулирование мощности установки поперечной емкостной компенсации (КУ) на посту секционирования (ПС) контактной сети переменного тока осуществляется с целью компенсации реактивной мощности и снижения потерь напряжения. Сложность же процесса в том, что нет информации о значении тяговой нагрузки в тяговой сети межподстанционной зоны [1], и регулирование идет по напряжению на ПС. Однако его уровень, к сожалению, не отражает степень загрузки тяговой сети, поскольку зависит от изменяющегося напряжения шин тяговой подстанции. Вот почему регулирование мощности КУ происходит с погрешностью выбора момента включения и отключения.

Отсюда и предложение оценивать степень загрузки тяговой сети и, следовательно, регулировать мощность КУ по падению напряжения между тяговой подстанцией и ПС. А соответственно и цель статьи – на примере реального участка тягового электроснабжения рассмотреть возможность повышения точности регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на посту секционирова-

ния путем передачи данных по напряжению шин 27,5 кВ тяговых подстанций.

ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ

Управление установкой поперечной емкостной компенсации отражает рис. 1, на котором приняты следующие обозначения: 1 – блок-контакт выключателя КУ; 2 – приемный полукомплект телемеханики ПС; 3 – реле времени. Характеристика напряжения поста секционирования поступает в расчетный блок от трансформатора ТН.

Потери активной мощности в тяговой сети с КУ на посту секционирования в матричной форме равны

$$\Delta P = I^t R I, \quad (1)$$

где $I = |I_1, I_2, \ldots I_k|$ – вектор-столбец токов ЭПС $(I_1, I_2 \ldots)$ и КУ (I_k);

R – квадратная матрица узловых активных сопротивлений контактной сети (узлы 1,2,... k);

I^t – сопряженное и транспонированное значение тока.

Минимум потерь мощности определим из (1), вычислив производную dP/dI_k и приравняв её нулю.

В результате получим условие минимальных потерь в тяговой сети:

$$I_k R_{kk} = \sum I_{pi} R_{ik}, \quad (2)$$

то есть потеря напряжения до КУ (узел k) на узловом активном сопротивлении R_{kk} от тока КУ должна быть равна потерям напряжения от реактивных токов I_{pi} тяговой нагрузки до КУ.

Узловые сопротивления R_{kk}, R_{ik} и X_{kk} проще рассчитать по программе РАСТ-05К [2].

На посту секционирования напряжение измеряется с помощью трансформатора ТН, который определяет $U_{пс}$.

Тогда потери напряжения в тяговой сети от тяговой подстанции и до ПС равны

$$\Delta U_{пс} = U_о - U_{пс}, \quad (3)$$

где $U_о$ – напряжение на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции.

Если на ПС включена КУ, то потери напряжения до ПС равны

$$\Delta U_{пс\,(k)} = U_о - U_{пс\,(k)}, \quad (3а)$$

где индексы $(_k)$ указывают на включенную КУ.

Потери напряжения в тяговой сети $\Delta U_{пс}$ от тяговой нагрузки равны [2]:

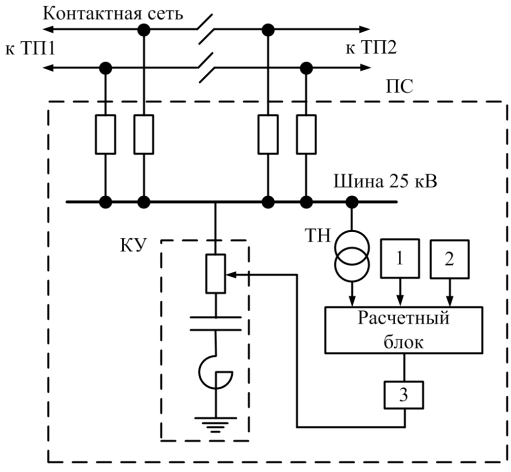

Рис. 1. Принципиальная схема установки.

$$\Delta U_{пс} = \sum (I_p R_{ik} + I_q X_{ik}) =$$
$$= \sum I_i (\cos\phi\, R_{ik} + \sin\phi\, X_{ik}) =$$
$$= (\sum I_i R_{ik)} (\cos\phi + q \sin\phi) = (\sum I_i R_{ik}) a. \quad (4)$$

Здесь I_p, I_q – активная и реактивная составляющие токов тяговой нагрузки (считаем, что cosϕ тяговой нагрузки (всех электровозов) одинаковые). Выражение $(\cos\phi\, R_{ik} + \sin\phi\, X_{ik}) = Z_{ik\,(c)}$ принято называть составным сопротивлением [2], которое может использоваться в расчетах тяговых сетей с установкой поперечной емкостной компенсации в первом приближении по первой гармонике, как это указано в [2].

Если $Z_{ik\,(c)}$ разделить на R_{ik}, то величину $a = Z_{ik\,(c)} / R_{ik} = (\cos\phi + q \sin\phi)$ назовем как относительное значение составного сопротивления. Поскольку для практических расчетов обычно принимают cosϕ всех ЭПС одинаковыми, а соотношение $q = X_{ik}/R_{ik}$ – const, то для любой подстанционной зоны можно считать, что a = const.

Как видно (4), потерю напряжения $\sum I_i R_{ik}$ можно определить по измеренной потере напряжения $\Delta U_{пс}$:

$$\sum I_i R_{ik} = \Delta U_{пс} / a. \quad (5)$$

Так как для реактивного тока КУ $\cos\phi = 0$, а $\sin\phi = 1$, то потери напряжения до КУ от его реактивного тока, в частности, при одностороннем питании ПС по тяговой сети, будут равны $I_k X_{kk}$, то есть при замеренном токе I_k можно рассчитать потери напряжения $I_k X_{kk}$ при известном сопротивлении X_{kk}.

Что касается потерь напряжения $\sum I_{pi} R_{ik}$ от реактивных тяговых нагрузок, то они рассчитываются по измеренным потерям

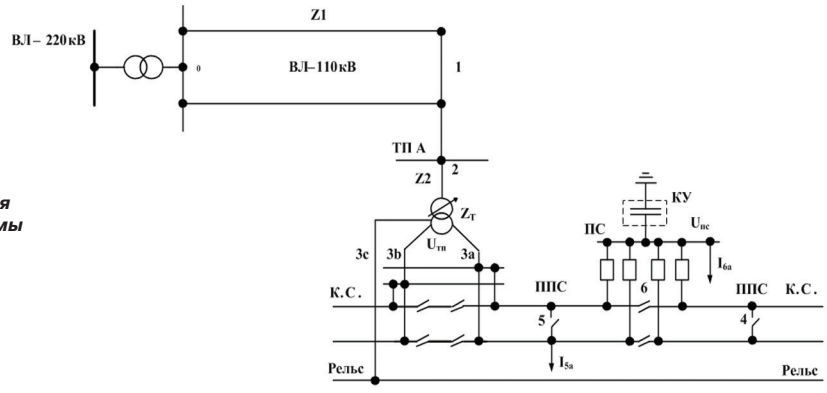

Рис.2. Схема электроснабжения участка А-Ш системы 25 кВ.

напряжения от тяговой нагрузки без КУ:

$$\sum I_{pi} R_{ik} = \Delta U_{пс} (cos\,\phi) / a. \quad (6)$$

Таким образом, для расчета $\sum I_{pi} R_{ik}$ необходимо замерить $\Delta U_{пс}$, которое следует умножить на $cos\phi$/а. Значения X_{kk}, R_{kk} *и* R_{ik} для каждой межподстанционной зоны проще определить по программе РАСТ-05К.

При включенной КУ потери напряжения:

$$\sum I_{pi} R_{ik} = \Delta U_{пс\,(k)} (cos\,\phi) / a.$$

Из сказанного следует порядок определения оптимального значения тока КУ на основании измерений потерь напряжения, который оформим в виде алгоритма.

КУ ОТКЛЮЧЕНА

1. Измерение напряжения на ПС без КУ $U_{пс}$.

2. Получение информации по телемеханике о напряжении на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, питающих зону – $U_о$. Если напряжения разные, то принимается их среднее значение.

3. Определяется $\Delta U_{пс}$ по выражению (3).

4. Рассчитывается (6):

$$\sum I_{pi} R_{ik}, = \Delta U_{пс}\, cos\phi/a.$$

5. Рассчитывается I_k из (2) и (6):

$$I_k = (\sum I_{pi} R_{ik}) / R_{kk} = \Delta U_{пс}\, cos\phi/a R_{kk} = = \Delta U_{пс}\, cos\phi/ Z_{kk\,(c)}, \quad (7)$$

Таблица 1

Исходные данные по параметрам схемы (рис. 2)

Сопротивление СВЭ, Ом
$Z1$ = 0,35+j 0,89 Сопротивление двухцепной ВЛ-110 кВ
$Z2$ = 0,6+j 1,1
$Z_т$ = 0,1+j 1,886

где $Z_{kk\,(c)} = Zk_{(c)}$ – составное сопротивление узла подключения КУ.

6. Рассчитывается мощность КУ, которая была бы оптимальной для измеренной потери напряжения (то есть в этом случае были бы наименьшие потери мощности при включении КУ (7)):

$$Q_k = 27,5 I_k. \quad (8)$$

7. Если полученная $Q_k \geq 0,5 Q_{ko}$ (где Q_{ko} – мощность КУ), то дается команда с выдержкой времени на включение КУ.

КУ ВКЛЮЧЕНА

1. Измерение напряжения на ПС с КУ – $U_{пс\,(к).}$

2. Получение информации по телемеханике о напряжении на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, питающих зону. Если напряжения разные, то принимается их среднее значение.

3. Определяется $\Delta U_{пс\,(к)}$ по выражению (3а).

4. Рассчитывается потеря напряжения, если бы КУ была отключена (то есть без учета КУ):

$$\Delta U_{пс} = U_о - U_{пс\,(к)} - I_k X_{kk}. \quad (9)$$

5. Рассчитывается ток КУ по аналогии с (7):

$$I_k = (U_о - U_{пс\,(к)} - I_k X_{kk)}\, cos\phi/ Z_{k\,(c).} \quad (10)$$

6. Текущее значение целесообразной мощности КУ определяется по формуле (8).

7. Если полученная $Q_k \leq 0,5 Q_{ko}$ (где Q_{ko} – мощность КУ), то дается команда с выдержкой времени на отключение КУ.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

По предложенному алгоритму проведены расчеты в программе РАСТ-05К [3]. Для упрощения расчетов рассмотрен участок

Таблица 2

Результаты вычислений

№ опыта	Положение КУ	Падение напряжения до поста секционирования ΔU, кВ	Потери напряжения до поста секционирования ΔU, кВ	Напряжение на подстанции /на посту секционирования (по показаниям вольтметра), кВ	Текущее значение целесообразной мощности КУ, рассчитанной по падению напряжения / по потерям, Q_k	Сигнал управления на КУ
1	откл.	0,983+i 0,612	0,98	27,75 / 26,8	1,802/1,805	Без управления
2	откл.	3,276+i 2,039	3,27	24,8/21,98	3,106/3,099	Включить

тяговой сети с односторонним питанием. В сети двухпутного участка установлены пост секционирования с КУ и пункты параллельного соединения (ППС). Распределенную тяговую нагрузку эквивалентировали в узлы 5 (ППС) и 6 (ПС).

Сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны Zтс$_1$ = 2,775+j 7,2 Ом.

Нагрузки по 100 А (фаза «–37°») сосредоточены у ППС и ПС. Установим напряжение на ТП А – 27,5 кВ (все параметры сети приводим к напряжению 27,5 кВ, поэтому для тяговой обмотки берем номинальное значение коэффициента трансформации $K_т$=1). Принимаем номинальную мощность КУ – *5,5 Мвар*.

Далее предполагаем (опыт 3 и 4), что нагрузка на участке изменилась: у ППС – 400 А, а у ПС – 300 А.

Принимая, что пост секционирования находится в середине рассматриваемого участка, получим для составного сопротивления:

$Z_{ik\,(c)} = \cos\phi\ 2{,}775 + \sin\phi\ 7{,}2.$

Полученную мощность КУ сравниваем с $0{,}5\,Q_{ko}$=2,75 Мвар. Опытные данные сведены в таблицу 2.

Как видно (таблица 2), при малой нагрузке КУ остаётся отключенной, а при большой – установку следует включить.

Сравнительная погрешность при расчетах по падению и потерям напряжения составляет десятые доли процентов. Однако главная погрешность целесообразной мощности КУ будет определяться принятым значением cosϕ (sinϕ).

На магистральных участках железной дороги коэффициент мощности тяговой нагрузки изменяется в сравнительно узких пределах [1]. Поэтому проведем расчеты погрешности при изменении фазы тока от 29° до 45°.

Тогда при тяговой нагрузке 400 А у ППС и 300 А у ПС текущее значение целесообразной мощности КУ, рассчитанной по потерям напряжения, будет изменяться от 3,757 до 2,548 Мвар, что составляет погрешность до 22%. Расчеты выполнены при большой тяговой нагрузке, когда меньше сказывается уравнительный ток на коэффициент мощности.

Полученные результаты свидетельствуют о приемлемости расчетов по предлагаемому алгоритму, так как рассматриваемая погрешность в несколько раз меньше, чем по аналогичному расчету, сделанному по режиму напряжения на шинах КУ поста секционирования. Компьютерный эксперимент показал, что применение алгоритма повышает точность и, следовательно, эффективность регулирования мощности КУ.

ВЫВОДЫ

1. Предложен алгоритм управления установкой поперечной емкостной компенсацией поста секционирования тяговой сети переменного тока железной дороги, позволяющий повысить точность регулирования. Алгоритм предусматривает наличие информации о напряжении на шинах тяговой подстанции и поста секционирования.

2. Приведенный пример расчета показал приемлемость управления по разработанному алгоритму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

2. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

3. Герман Л. А., Морозов Д. А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ: Учеб.пособие. – М.: МИИТ, 2010. – 59 с.