

УДК 621.331.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Кондратьев Ю.В., Тарасенко А.В.

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», Омск,
e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Одним из наименее капиталоемких, а в некоторых случаях и единственно возможным способом усиления системы тягового электроснабжения переменного тока является применение устройств поперечной компенсации реактивной мощности. В статье рассмотрена методика определения параметров регулируемых и нерегулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности, используемых в системах тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ. Приведены расчеты входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения, возможные места установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности в зависимости от схемы питания и секционирования тяговой сети, проверка обеспечения минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Результаты работы могут быть использованы как для вновь проектируемых участков железной дороги, так и для участков, находящихся в эксплуатации, при решении вопросов увеличения пропускной способности.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, переменный ток, реактивная мощность, устройства компенсации, параметры

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF COMPENSATION OF REACTIVE POWER DEVICES

Kondratyev Y.V., Tarasenko A.V.

Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

One of the least capital-intensive, and in some cases the only possible way to Wuxi-ment AC traction power supply system is the use of cross-reactive power compensation devices. The article describes the method of determining the parameters of regulated and unregulated devices transverse compensation of reactive power, used in traction power supply systems of 25 kV and 2×25 kV. The calculations of the input resistance of the inductive system of external and traction power supply, possible places to install the device cross-reactive power compensation, depending on the power scheme and partitioning traction network, check to ensure a minimum level of voltage at the pantograph of electric rolling stock. The results can be used for both the newly designed railway stations and for stations in operation in dealing with increasing capacity.

Keywords: traction power supply, AC power, reactive power, compensation device, settings

В системе тягового электроснабжения железных дорог переменного тока для повышения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) широко используются устройства поперечной компенсации (УПК) реактивной мощности, параметры и месторасположение которых в значительной степени определяют технико-экономические показатели работы участка железной дороги.

Целью исследования является разработка методики определения оптимальных параметров УПК реактивной мощности.

Материалы и методы исследования

На рассматриваемом участке УПК могут располагаться на посту секционирования; автотрансформаторном пункте, совмещенном с постом секционирования; тяговой подстанции. Выбор места размещения УПК основывается на таких показателях системы тягового электроснабжения, как минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике ЭПС, ордината точки этого напряжения, расчетные и рекомендуемые значения коэффициента реактивной мощности тяговой нагрузки, максимальный 10-минутный ток тяговой нагрузки [1].

При решении вопроса повышения минимального напряжения на токоприемнике ЭПС расчеты в пер-

вую очередь выполняют для УПК, установленного на посту секционирования или автотрансформаторном пункте, совмещенном с постом секционирования, а в случае необходимости – предусматривают установку УПК на тяговых подстанциях.

Входные индуктивные сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения относительно сборных шин распределительного устройства поста секционирования ($X_{вх. А}$) и ординаты минимального напряжения на токоприемнике ЭПС ($X'_{вх. А}$), необходимые для расчета мощности УПК, зависят от схемы питания и секционирования контактной сети [2]. Определяют их либо аналитическим расчетом, либо на основе результатов расчета токов короткого замыкания в тяговой сети.

Аналитический расчет входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения 25 кВ относительно сборных шин распределительного устройства поста секционирования до тяговой подстанции А (В) для одностороннего режима питания рассматриваемого участка выполняют по формулам:

$$X_{вх. А} = X_{т.с. А} + 2X_{тр. А} + 2X_{с. А}, \quad (1)$$

$$X_{вх. В} = X_{т.с. В} + 2X_{тр. В} + 2X_{с. В}, \quad (2)$$

где $X_{вх. А}$, $X_{вх. В}$ – индуктивные сопротивления тяговой сети от поста секционирования до тяговой подстанции А и В соответственно, Ом;

$X_{тр.А}, X_{тр.В}$ – индуктивные сопротивления понижающих трансформаторов тяговой подстанции А и В соответственно, Ом;

$$X_{тр.А(В)} = \frac{u_k U_{ном}^2}{100 S_{тр} n}, \quad (3)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, %;
 $U_{ном}$ – номинальное напряжение тяговой обмотки понижающего трансформатора, кВ;
 $S_{тр}$ – номинальная мощность понижающего трансформатора, МВ·А;
 n – количество понижающих трансформаторов, включенных на сборные шины распределительного устройства напряжением 27,5 кВ, шт.;
 $X_{с.А}, X_{с.В}$ – входные индуктивные сопротивления системы внешнего электроснабжения, приведенные к сборным шинам распределительного устройства напряжением 27,5 кВ тяговой подстанции А и В соответственно, Ом;

$$X_{с.А(В)} = \frac{U_{ном}^2}{S_{к.з}}, \quad (4)$$

где $S_{к.з}$ – мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на шинах высшего напряжения тяговой подстанции А (В), МВ·А.

Входное индуктивное сопротивление $X'_{вх}$ определяют аналогично входному индуктивному сопротивлению $X_{вх}$.

При двухстороннем режиме питания рассматриваемого участка, а также при одностороннем режиме питания $X_{вх}$ до тяговых подстанций А и В рассчитывают по формуле:

$$X_{вх} = \frac{X_{вх.А} \cdot X_{вх.В}}{X_{вх.А} + X_{вх.В}}. \quad (5)$$

Входные индуктивные сопротивления $X_{вх}$ и $X'_{вх}$ системы внешнего и тягового электроснабжения 25 кВ на основе результатов расчета тока короткого замыкания определяют соответственно по формулам:

$$X_{вх} = \frac{U_{х.х}}{I_{к.зп.с}} \sin \phi, \quad (6)$$

$$X'_{вх} = \frac{U_{х.х}}{I_{к.змин}} \sin \phi, \quad (7)$$

где L – расстояние от поста секционирования до тяговой подстанции, определяемое зоной с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, км;
 l – расстояние от ординаты с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС до ординаты ближайшей тяговой подстанции, км;
 X_c – входное индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения тяговой подстанции с ординатой, ближайшей к ординате с минимальным напряжением на токо-

где $I_{к.з.п.с}$ – ток короткого замыкания на шинах поста секционирования, А;

ϕ – угол между напряжением холостого хода на сборных шинах распределительного устройства тяговых подстанций и током короткого замыкания, град;

$I_{к.з.мин}$ – ток короткого замыкания в ординате с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС, А.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчетную мощность регулируемого УПК на посту секционирования определяют из условия обеспечения на токоприемнике ЭПС минимального напряжения на уровне не ниже минимального нормируемого по формуле:

$$Q_{к.у} = \frac{U_{ном.К.У}^2 \cdot (U_{мин.доп} - U_{мин.факт})}{U_{мин.доп} \cdot X_{вх}}, \quad (8)$$

где $U_{ном.К.У}$ – номинальное напряжение УПК, принимаемое равным 27,5 кВ;

$U_{мин.доп}, U_{мин.факт}$ – минимальное допустимое и минимальное фактическое напряжение на токоприемнике ЭПС соответственно в границах рассматриваемого участка, кВ.

Минимальное допустимое напряжение (среднее значение за три минуты) на токоприемнике ЭПС принимают равным 21 кВ, а для участков с максимальной скоростью движения пассажирских поездов свыше 160 км/ч – равным 24 кВ (среднее значение за одну минуту).

В случае, если ордината минимального напряжения на токоприемнике ЭПС отличается от ординаты поста секционирования более чем на два километра, то выполняются корректировки мощности УПК, полученную по выражению (8), согласно формулам:

– для однопутного участка:

$$Q'_{к.у} = Q_{к.у} \frac{X_{вх}}{X'_{вх}}, \quad (9)$$

– для многопутного участка:

$$Q'_{к.у} = Q_{к.у} \left(1 + \frac{k_1 \cdot (L - l) \cdot x_{т.с}}{k_1 \cdot L \cdot x_{т.с} + 2(k_1 + k_2)(X_c + X_{тр})} \right), \quad (10)$$

приемнике ЭПС, приведенное к напряжению системы тягового электроснабжения, Ом;

$X_{тр}$ – индуктивное сопротивление трансформаторов тяговой подстанции с ординатой, ближайшей к ординате с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС, приведенное к напряжению системы тягового электроснабжения, Ом;

$x_{т.с}$ – удельное индуктивное сопротивление тяговой сети одного пути рассматриваемого участка с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, Ом/км;

k_1 – коэффициент токораспределения при соединении контактной сети поста секционирования, питающего участок с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС;

k_2 – коэффициент токораспределения остальных присоединений поста секционирования, питающего участка, до ординаты тяговой подстанции, ближайшей к ординате минимального напряжения на токоприемнике ЭПС.

Полученное по формулам (8) – (10) значение мощности УПК округляют до ближайшего большего значения номинальной мощности УПК, выпускаемого промышленностью.

Исходя из того, что максимальное повышение напряжения при использовании УПК не должно приводить к повышению напряжения в тяговой сети выше максимально допустимого (29 кВ), при выборе мощности нерегулируемого УПК должно выполняться неравенство:

$$\text{для } U_{\text{макс.доп}} \geq U_{\text{х.х}} \text{ и } U_{\text{мин.доп}} \geq U_{\text{мин.факт}} \\ U_{\text{мин.доп}} \geq U_{\text{мин.факт}} \leq U_{\text{макс.доп}} \geq U_{\text{х.х}} \quad (11)$$

где $U_{\text{макс.доп}}$, $U_{\text{х.х}}$ – максимальное допустимое напряжение в тяговой сети и напряжение холостого хода на сборных шинах распределительного устройства соответственно, кВ.

В случае, если неравенство (11) не соблюдается, то в составе оборудования УПК следует предусмотреть устройство защитного отключения, а также рассмотреть вариант подключения УПК к сборным шинам тяговой подстанции.

Мощность УПК также проверяют по критериям поддержания в границах рассматриваемого участка минимально допустимого уровня напряжения на токоприемнике ЭПС и обеспечения заданного коэффициента реактивной мощности, используя неравенство:

$$U_{\text{мин.ЭПС К.У}} \geq U_{\text{мин.доп}} \quad (12)$$

где $U_{\text{мин.ЭПС К.У}}$ – минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС при применении УПК, кВ.

Мощность УПК на посту секционирования $Q''_{\text{К.У}}$, соответствующая номинальному ряду мощностей УПК, выпускаемых промышленностью, должна быть больше или равна расчетному значению мощности $Q'_{\text{К.У}}$ и не превышать средней реактивной мощности тяговой нагрузки на рассматриваемом участке:

$$Q''_{\text{К.У}} \leq Q_{\text{ср.т.с}} \quad (13)$$

где $Q_{\text{ср.т.с}}$ – средняя реактивная мощность тяговой нагрузки на рассматриваемом участке, квар:

$$Q_{\text{ср.т.с}} = \frac{(W_{Q_{\text{т.с.А}}} + W_{Q_{\text{т.с.В}}})}{24D_{\text{инт.мес}}}, \quad (14)$$

где $W_{Q_{\text{т.с.А}}}$, $W_{Q_{\text{т.с.В}}}$ – расход реактивной электроэнергии подстанции А и В соответственно за месяц интенсивных нагрузок по присоединениям контактной сети, питающих рассматриваемый участок, квар·ч; $D_{\text{инт.мес}}$ – число суток интенсивного месяца.

В случае невыполнения неравенства (13) номинальную мощность УПК, размещаемого на посту секционирования, ограничивают значением, не превышающим $Q_{\text{ср.т.с}}$.

При несоблюдении неравенства (12) для выбранной мощности УПК на посту секционирования предусматривают дополнительное УПК на одной из смежных тяговых подстанций. Для регулируемых УПК проверку по условиям (12) и (13) не выполняют.

Для определения мощности УПК, размещаемого на тяговой подстанции, повторяют расчет по формуле (8), учитывая при этом в составе исходных данных мощность УПК на посту секционирования, выбранную с учетом ограничений (12) – (14).

Расчетную реактивную мощность, потребляемую тяговой подстанцией с учетом выбранных УПК, определяют по формуле:

$$Q_{\text{ТП}}^* = \frac{W_Q}{24D_{\text{инт.мес}}} - \left(Q_{\text{к1}} + Q_{\text{к2}} + Q_{\text{к.п.с1}} \frac{L_{\text{AB}} - l_{\text{АП}}}{L_{\text{AB}}} + Q_{\text{к.п.с2}} \frac{L_{\text{CA}} - l'_{\text{ПА}}}{L_{\text{CA}}} \right), \quad (15)$$

где $\frac{W_Q}{24D_{\text{инт.мес}}}$ – реактивная мощность тяговой подстанции без учета УПК за интенсивный месяц, Мвар;

$Q_{\text{к1}}$, $Q_{\text{к2}}$ – мощность УПК на фазах тяговой подстанции, Мвар;

$Q_{\text{к.п.с1}}$, $Q_{\text{к.п.с2}}$ – мощность УПК на постах секционирования справа и слева от подстанции соответственно, Мвар;

L_{AB} , L_{CA} – расстояния между тяговыми подстанциями А, В и А, С соответственно, км; $l_{\text{АП}}$, $l'_{\text{ПА}}$ – расстояния до постов секционирования справа и слева от подстанции А, км.

УПК для тяговой подстанции выбирают из выпускаемых промышленностью, при этом номинальная мощность выбранного УПК не должна превышать реактивной мощности тяговой подстанции, рассчитываемой по формуле (15).

После выбора УПК, размещаемого на тяговой подстанции, выполняют проверку по обеспечению поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС в соответствии с неравенством (12), а также максимального уровня напряжения на сборных шинах тяговой подстанции в соответствии с неравенством (11). Для регулируемых УПК проверку по условиям (11) и (12) не выполняют.

Выводы

Использование предлагаемой методики расчета, по результатам которого определяется оптимальная мощность УПК и его

месторасположение, позволит улучшить технико-экономические показатели работы участка железной дороги, а также повысить напряжение в контактной сети и увеличить пропускную и провозную способность.

Список литературы

1. Вильгельм А.С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока / А.С. Вильгельм, А.А. Комяков, В.Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 3 (19). – С. 54–65.
2. Кондратьев Ю.В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности / Ю.В. Кондратьев, А.В. Тарасенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – № 2 (22). – С. 79–87.