



Риски компенсирует система тягового электроснабжения



Станислав ВЛАСОВ

Stanislav P.VLASOV

В статье показаны риски возникновения опасных и аварийных ситуаций при движении поездов на линии с напряжением тяговой сети переменного тока 25 кВ ниже номинального уровня. Предлагается способ повышения напряжения до номинального путем совместного применения нового технического средства – вольтодобавочных трансформаторов и традиционного средства усиления – установок поперечной емкостной компенсации.

Ключевые слова: безопасность, поезд, скорость, график, авария, уровень напряжения, вольтодобавочный трансформатор, емкостная компенсация.

Власов Станислав Петрович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Современные тенденции в развитии и совершенствовании электрифицированного транспорта связаны с повышением его технико-экономической эффективности, обеспечением безопасности и бесперебойности движения поездов, внедрением энергосберегающих технологий. Значительные усилия предпринимаются для внедрения высокоскоростного движения пассажирских поездов.

Отсюда следует, что все устройства железнодорожного транспорта, связанные с эксплуатацией и безопасностью движения, особенно с перевозкой пассажиров, должны работать безотказно, надёжно и экономично в течение всего межремонтного периода. На электрифицированных железных дорогах к таким устройствам относится прежде всего система тягового электроснабжения (СТЭ), которая обеспечивает необходимый уровень напряжения в тяговой сети на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС) и пропуск токов тяговых нагрузок без перегрева проводов контактной подвески [1].

Уровень напряжения в тяговой сети регламентирован требованиями стандартов и ПТЭ. При нормальной схеме питания номинальное напряжение на шинах

тяговой подстанции переменного тока установлено 27,5 кВ, а в тяговой сети на токоприемнике электровоза — 25 кВ. Наибольшее допустимое напряжение на токоприемнике 29 кВ, а наименьшее — 21 кВ. На тех участках железных дорог, где скорость движения поездов превышает 120 км/ч, напряжение на токоприемнике не может быть ниже 24 кВ. На малоделятельных участках допускается минимальное напряжение 19 кВ.

При значительных тяговых нагрузках напряжение в тяговой сети на токоприемниках ЭПС может оказаться не только ниже номинального значения 25 кВ, но и ниже 24 кВ (становится невозможным скоростное движение поездов), даже ниже 21 и 19 кВ (происходит отключение ЭПС от тяговой сети).

При длительном понижении напряжения уменьшается сила тяги электровоза; при этом скорость движения поезда снижается до тех пор, пока не восстановятся прежние значения тока и силы тяги. Время движения поезда по перегону в этом случае увеличивается, что приводит к нарушению графика движения поездов.

На многих участках железных дорог существуют так называемые инерционные подъемы, для преодоления которых поезд должен набрать необходимую кинетическую энергию при подходе к ним. Пониженное напряжение на токоприемнике электровоза не даст поезду набрать нужный запас кинетической энергии для преодоления инерционного подъема, и он остановится на нем. Следует отметить, что кинетическая энергия поезда пропорциональна квадрату скорости его движения, а скорость пропорциональна напряжению в тяговой сети. Остановившийся на подъеме поезд придется либо вывозить по частям, либо запрашивать резервный локомотив. Это приведет к нарушению графика движения поездов. Кроме того, может произойти и скатывание остановившегося на подъеме поезда под уклон, а это сопряжено уже с аварийной ситуацией.

При пониженном напряжении на токоприемнике ухудшаются условия работы всего вспомогательного электрооборудования электровоза (вентиляторов, компрессоров и т. д.), что может вызвать аварийную ситуацию на самом электровозе и привести к остановке поезда, нарушению графика

движения и создать предпосылки для столкновения поездов.

Значительная часть железнодорожных магистралей России электрифицирована по системе однофазного переменного тока промышленной частоты напряжением 25 кВ [1]. Питание тяговой сети осуществляется от трёхфазных тяговых трансформаторов с соединением высоковольтной и тяговой обмоток по схеме «звезда-треугольник». При этом тяговый трансформатор работает в несимметричном режиме, вследствие чего уровень напряжения на так называемой отстающей фазе оказывается ниже, чем на опережающей фазе при одинаковых токовых нагрузках обоих плеч питания тяговой подстанции. Эта разница напряжений может достигать 1,5–2,0 кВ и более.

Электровоз, проходя через нейтральную вставку, которая устанавливается вблизи тяговой подстанции, переключается с опережающей фазы через нулевое значение на отстающую фазу с пониженным уровнем напряжения (или наоборот). Это сопровождается скачками напряжения на токоприемнике электровоза, что приводит к резкому скачкообразному изменению тока и тягового усилия электровоза. Пассажиры испытывают дискомфорт, а сцепные приборы поезда — дополнительные механические усилия.

На межподстанционной зоне, питаемой с двух сторон отстающими фазами соседних подстанций, уровень напряжения может оказаться не только ниже номинального напряжения тяговой сети 25 кВ, но и ниже 24 кВ, что приводит к существенному снижению скорости движения и делает невозможным полноценное высокоскоростное движение.

Как известно, при увеличении размеров движения поездов, увеличении их числа и массы возрастают токовые нагрузки на СТЭ, растут потери напряжения в тяговой сети, трансформаторах ТП и СВЭ, а как следствие этого — понижается уровень напряжения на шинах тяговых подстанций и в тяговой сети. Незначительное понижение напряжения может быть скомпенсировано устройствами регулирования напряжения тяговых трансформаторов. При значительных просадках напряжения, вызванных большими тяговыми нагрузками, требуется усиление СТЭ по напряжению и току.





Рассмотрим техническую эффективность некоторых традиционных средств усиления.

Усиливающие провода (УП) применяются, главным образом, для усиления тяговой сети по току, то есть — обеспечения пропуска значительных токов тяговых нагрузок на головных участках фидерных зон (от ТП до первого с его стороны пункта параллельного соединения контактных подвесок путей). Техническая эффективность применения УП с целью снижения потерь напряжения в тяговой сети невелика — 15–20 В на км длины провода. С увеличением длины УП их эффективность снижается. Двойной УП менее эффективен, чем одиночный двойной длины [2].

Эффект действия установок поперечной ёмкостной компенсации (УППК) объясняется компенсацией реактивной (индуктивной) составляющей тока тяговой нагрузки. При этом в тяговой сети и СВЭ уменьшаются потоки реактивной энергии и, как следствие этого, уменьшаются потери энергии и напряжения. Поэтому питающая энергосистема заинтересована в применении в сетях потребителей, в том числе и на электрифицированных железных дорогах, УППК. Их техническая эффективность составляет 130–150 В уменьшения потерь напряжения на один Мвар установленной реактивной мощности. При этом значительно уменьшаются потери энергии в системе энергоснабжения.

Эффект действия установок продольной ёмкостной компенсации (УПРК) основывается на компенсации индуктивного сопротивления цепи питания, являющегося основным сопротивлением между источником питания и потребителем-электровозом. При включении УПРК в цепь отсоса эффект их действия распространяется сразу на обе смежные фидерные зоны, питаемые от данной ТП, и при допустимом токе установки 1370 А достигает 450 В на отстающей фазе и 170 В на опережающей фазе ТП.

Техническая эффективность УПРК, включаемых в отстающую фазу ТП, составляет 200–250 В на один Мвар установленной реактивной мощности УПРК при том же токе 1370 А.

Для исключения отрицательного влияния эффекта отстающей фазы при значительных тяговых нагрузках необходимо

поднять уровень напряжения на отстающей фазе подстанции до уровня напряжения на опережающей фазе и осуществлять его регулирование. Это может быть достигнуто с помощью нового средства усиления СТЭ — вольтодобавочного трансформатора (ВДТ).

В результате исследований, выполненных на кафедре ТОЭ МИИТ по заказу Красноярской железной дороги, были сформулированы требования к электрическим параметрам ВДТ. Производство унифицированных трансформаторов типа ОРМЖ-10000/27, которые могут применяться в качестве ВДТ, а также для других целей, было налажено на заводе СВПО «Трансформатор» в г. Тольятти в 1989 году [3].

Трансформатор ОРМЖ-10000/27 представляет собой специальный однофазный двухобмоточный трансформатор. Обмотка ВН выполнена на номинальное напряжение 27,5 кВ, её номинальная мощность 10000 кВ·А. Обмотка НН состоит из двух самостоятельных секций с номинальным напряжением по 2,5 кВ. Одна из секций имеет дополнительное ответвление от середины секции. При работе трансформатора в качестве ВДТ возможны следующие соотношения напряжений и мощностей обмотки НН:

1,25 кВ	2500 кВ·А
2,5 кВ	5000 кВ·А
3,75 кВ	7500 кВ·А
5 кВ	10000 кВ·А

Потери холостого хода трансформатора — 10 кВт, потери короткого замыкания — 50 кВт, Напряжение короткого замыкания — 5%, ток холостого хода — 0,6%. Поперечная изоляция всех обмоток и изоляция всех вводов трансформатора выполнены на номинальное напряжение 27,5 кВ. Масса: полная — 21,5 т, транспортная — 17,5 т. Габаритные размеры: длина — 3500 мм, высота — 4900 мм, ширина — 4600 мм.

Для повышения напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции и выравнивания напряжений на концах участка тяговой сети по модулю и фазе с целью ограничения уравнительного тока и уменьшения потерь электрической энергии в тяговой сети вольтодобавочная обмотка (ВДО) ВДТ включается в рассечку плеча питания тяго-

вой подстанции, имеющего наиболее низкое напряжение. Таким является обычно плечо, питаемое отстающей фазой тягового трансформатора. Первичная обмотка (ПО) ВДТ может быть подключена к любой из трех фаз тяговой обмотки в зависимости от условий питания тяговой сети.

Если напряжения на шинах соседних подстанций, питающих межподстанционную зону, существенно различаются по величине при незначительном фазовом сдвиге, то ПО ВДТ следует подключить к «своей» — отстающей фазе тягового трансформатора. При этом напряжение, добавляемое ВДТ в тяговую сеть, совпадает по фазе с базовым. Регулируя величину напряжения вольтодобавки (1,25–2,5–3,75–5 кВ), можно добиться выравнивания напряжений на концах межподстанционной зоны по величине и существенного ограничения уравнительного тока, вызванного наличием продольной составляющей разности напряжений на шинах соседних подстанций.

Если напряжение на шинах соседних подстанций, питающих с двух сторон межподстанционную зону, различаются не только и не столько по величине, но и фазе, то следует применить иные схемы подключения ПО ВДТ к тяговому трансформатору. ПО ВДТ надо подключить либо к опережающей, либо к свободной фазе тягового трансформатора. В первом случае вектор напряжения вольтодобавки добавляется к базовому напряжению отстающей фазы под углом -60° электрических градусов, во втором — под углом $+60^\circ$ электрических градусов. При этом условно можно полагать, что 50% абсолютной величины напряжения вольтодобавки ($\Delta U \cos 60^\circ = 0,5 \Delta U$) реализуется для повышения напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции и компенсации продольной составляющей разности напряжений, а 86,5% ($\Delta U \sin 60^\circ = 0,865 \Delta U$) — для компенсации поперечной составляющей разности напряжений на шинах соседних подстанций. Некоторые вопросы применения указанных схем включения ВДТ содержит работа [4].

Рассмотрим техническую эффективность совместного применения вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) и установки поперечной ёмкостной компенсации (УППК) с целью повышения напряжения в тяговой сети [5].

Поясним, в чем заключается взаимное положительное влияние ВДТ и УППК при их совместной работе в СТЭ. ВДТ, повышая напряжение в тяговой сети, обеспечивает более высокое напряжение и на УППК. При этом УППК генерирует большую реактивную мощность, так как генерируемая мощность пропорциональна квадрату напряжения на УППК. В свою очередь УППК, уменьшая реактивную составляющую тока в тяговой сети, ВДТ, тяговом трансформаторе и питающей электрической системе, уменьшает потери напряжения в этих элементах цепи и улучшает тем самым условия питания ВДТ. При этом ВДТ обеспечивает получение большей величины вольтодобавки.

Исследование эффективности совместной работы ВДТ и УППК выполнено автором применительно к условиям двухпутного участка длиной 48 км методом математического моделирования [5].

Контактная подвеска ПБСМ 95 + МФ 100, рельсы Р-65. Участок питается слева от отстающей фазы первой тяговой подстанции, а справа от опережающей фазы второй подстанции, то есть рассматривается наиболее общий случай несимметричного питания участка тяговой сети. В расчетах исследовалась тяговая нагрузка с удельной мощностью 250, 500 и 1000 кВт/км.

Входное сопротивление тяговых трансформаторов и питающей системы на фазу принималось равным $1+j5 \text{ Ом}$, $1,5+j7,5 \text{ Ом}$, $2+j10 \text{ Ом}$ и $3+j15 \text{ Ом}$. Напряжение холостого хода на шинах подстанций во всех случаях — 29 кВ.

Установка поперечной ёмкостной компенсации располагалась на посту секционирования в средней точке фидерной зоны, то есть на расстоянии 24 км от подстанций. Номинальная мощность УППК изменялась в расчетах ступенями от 0 (УППК отсутствует) до 15,0 Мвар.

ВДО ВДТ была включена в рассечку фидера отстающей фазы левой тяговой подстанции. Расчеты выполнялись при изменении коэффициента передачи ВДТ от 1,00 (ВДТ отсутствует) до 1,20.

В результате получен большой объем расчетных данных.

Анализ расчетов показывает, что коэффициент повышения напряжения в средней точке фидерной зоны при совместной ра-





Таблица 1

Зависимость коэффициента $\delta_{U_{ВДТ}}$ от коэффициента передачи ВДТ

к	0	1,05	1,10	1,15	1,173	1,20
$\delta_{U_{ВДТ}}$	0	0,022	0,044	0,064	0,073	0,083

боте ВДТ и УППК в первом приближении можно определить с помощью зависимости $\alpha = 1 + \delta_{U_{\Sigma}} = (1 + \delta_{U_{ВДТ}}) (1 + \delta_{U_{УППК}}) (1 + \delta_{U_{ВЗ}})$ (*), где: $\delta_{U_{ВДТ}}$ – относительный прирост напряжения в месте подключения УППК за счет применения ВДТ; $\delta_{U_{УППК}}$ – относительный прирост напряжения в месте подключения УППК за счет применения УППК; $\delta_{U_{ВЗ}}$ – относительный прирост напряжения в месте подключения УППК за счет взаимного положительного влияния ВДТ и УППК.

Коэффициенты, входящие в выражение (*), легко определяются по известной методике; их значения приведены в таблицах 1 и 2.

Абсолютная величина напряжения в средней точке фидерной зоны при наличии УППК и ВДТ:

$$U = \alpha U_0 = U_0 (1 + \delta_{U_{ВДТ}}) (1 + \delta_{U_{УППК}}) (1 + \delta_{U_{ВЗ}}),$$

где U_0 – напряжения в средней точке фидерной зоны в отсутствии ВДТ и УППК.

Если одно из средств усиления – УППК или ВДТ – отсутствует, то соответствующий коэффициент – $\delta_{U_{УППК}}$ или $\delta_{U_{ВДТ}}$ – равен нулю. Естественно, что в этом случае и $\delta_{U_{ВЗ}} = 0$.

Величины напряжения U_0 в средней точке фидерной зоны в отсутствии УППК и ВДТ приведены в таблице 3.

В качестве примера определим абсолютную величину напряжения в средней точке фидерной зоны, питаемой отстающей и опережающей фазами тяговых подстанций с сопротивлениями на фазу $Z = 3 + j15 \text{ Ом}$, при совместном применении УППК с номинальной мощностью $Q_H = 10,0 \text{ Мвар}$ (устанавливается на посту секционирования) и ВДТ с коэффициентом передачи $k = 1,173$, устанавливаемого в отстающей фазе левой тяговой подстанции, при удельной мощности тяговой нагрузки $P_0 = 500 \text{ кВт/км}$.

В таблице 3 для указанных условий $U_0 = 21,11 \text{ кВ}$, в таблице 1 – $\delta_{U_{ВДТ}} = 0,073$, по таблице 2 – $\delta_{U_{УППК}} = 0,092$ и $\delta_{U_{ВЗ}} = 0,022$.

Находим искомое напряжение:

$$U = 21,21 (1 + 0,073) (1 + 0,092) (1 + 0,022) = 21,11 \cdot 1,073 \cdot 1,092 \cdot 1,022 = 25,28 \text{ кВ}.$$

Точный расчет дает величину 25,21 кВ.

Следует отметить, что полученные результаты относятся к участку железной дороги с конкретными параметрами СТЭ. Однако эти результаты без больших погрешностей можно применить к участкам тягового электроснабжения с параметрами, частично отличающимися от рассматриваемых.

Таблица 2

Зависимости коэффициентов $\delta_{U_{УППК}}$ и $\delta_{U_{ВЗ}}$ от мощности УППК и от входного сопротивления подстанций

$Q_{УППК}$ Мвар	$\delta_{U_{УППК}}$ при Z (Ом)			$\delta_{U_{ВЗ}}$ при Z (Ом)		
	1,5+j7,5	2+j10	3+j15	1,5+j7,5	2+j10	3+j15
5	0,030	0,036	0,046	0,004	0,007	0,010
10	0,061	0,072	0,092	0,007	0,013	0,022
15	0,091	0,108	0,138	0,010	0,020	0,032

Таблица 3

Напряжение в средней точке фидерной зоны U_0 в отсутствии УППК и ВДТ

P_0 , кВт/км	Напряжение U_0 в средней точке фидерной зоны (кВ) при сопротивлениях Z			
	1+j5	1,5+j7,5	2+j7,5	3+j15
250	27,25	26,66	26,17	25,16
500	25,47	24,26	23,23	21,11
1000	21,76	19,28	17,03	-

Таким образом, совместное применение ВДТ и УППК позволяет повысить напряжение в середине фидерной зоны от минимально допустимой по ПТЭ величины $\sim 21,1$ кВ до 25,2 кВ даже при весьма тяжелых условиях питания тяговой сети, когда входное сопротивление подстанции со стороны шин 27,5 кВ составляет $3+j15$ Ом, и обеспечить в этих условиях скоростное движение поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для обеспечения безопасного и бесперебойного движения поездов, в том числе и высокоскоростных (более 120 км/ч), по электрифицированным участкам переменного тока следует поддерживать напряжение в тяговой сети на токоприемниках ЭПС не ниже 24–25 кВ.

2. Для поддержания напряжения в тяговой сети на указанном уровне при повышенных тяговых нагрузках можно использовать традиционные средства усиления системы тягового электроснабжения по току и напряжению — усиливающие провода, установки продольной и поперечной ёмкостной компенсации.

3. Для более существенного повышения уровня напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции и соответственно в тяговой сети при значительных нагрузках может применяться вольтодобавочный трансформатор с включением его вольтодобавочной обмотки в рассечку фидера отстающей фазы подстанции.

4. При применении вольтодобавочных трансформаторов может осуществляться продольно-поперечное регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций, позволяющее достигнуть выравнивания напряжений на отстающей и опережающей фазах тяговой подстанции, а также на концах межподстанционной зоны по модулю

и фазе, что обеспечит повышение пропускной способности участка железной дороги, приведет к уменьшению уравнительного тока и потерь энергии в системе тягового электроснабжения от его протекания.

5. Возможен комбинированный вариант включения вольтодобавочного трансформатора, в котором в рассечку отстающей фазы тяговой подстанции включается одна секция вольтодобавочной обмотки ВДТ с напряжением вольтодобавки 2,5 кВ, а к второй секции этой обмотки с напряжением 2,5 кВ подключается батарея конденсаторов, то есть установка параллельной ёмкостной компенсации.

6. Наиболее весомый технико-экономический эффект может быть достигнут при совместном применении вольтодобавочных трансформаторов, устанавливаемых на тяговых подстанциях при включении вольтодобавочной обмотки в рассечку отстающей фазы, и установок поперечной ёмкостной компенсации, устанавливаемых на постах секционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт. 1982.
2. Власов С. П. Повышение безопасности движения поездов путем усиления системы тягового электроснабжения. Безопасность движения поездов//Труды VIII научно-практической конференции. Часть I. — М.: МИИТ, 2007.
3. Власов С. П. Многофункциональный вольтодобавочный трансформатор//Транспорт: наука, техника, управление. — 1994. — № 5.
4. Власов С. П. О возможности применения вольтодобавочных трансформаторов для ограничения уравнительных токов в электротяговых сетях магистральных железных дорог переменного тока//Транспорт: наука, техника, управление. — 2005. — № 11.
5. Власов С. П. Исследование эффективности совместного применения ВДТ и УППК с целью повышения напряжения в тяговой сети переменного тока 25 кВ для осуществления высокоскоростного движения поездов. Безопасность движения поездов//Труды IX научно-практической конференции. — М.: МИИТ, 2008. ●

THE SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY NEUTRALIZES THE RISKS

Vlasov, Stanislav P. — D.Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The author describes the risks of dangerous situations and accidents at the railways with traction tension of 25 kV AC when the voltage is lower than nominal level. The author proposes a technique to raise the voltage to its nominal value using simultaneously the traditional method of transversal capacitive compensation and a new one, that of booster transformers.

Key words: safety, train, speed, schedule, accident, tension level, booster transformer, capacitive compensation.

Координаты автора (contact information): Власов С. П. — (495) 684–2462.

