

# Комбинированная поперечная компенсация линий сверхвысокого напряжения

ЗИЛЬБЕРМАН С. М., КРАСИЛЬНИКОВ Е.Н.

Предложена комбинированная поперечная компенсация воздушных линий сверхвысокого напряжения, содержащая помимо традиционных шунтирующих реакторов, подключенных к линии реакторными выключателями, также постоянно подсоединенные реакторы по схеме звезды с незаземленной нейтралью. Использование комбинированной компенсации позволяет исключить резонансные перенапряжения при неполнофазных режимах, более эффективно снижать токи дуги подпитки в паузу ОАПВ, а также повысить уровень динамической устойчивости при ликвидации наиболее вероятных однофазных КЗ в цикле ОАПВ.

Ключевые слова: воздушные линии, сверхвысокое напряжение, шунтирующий реактор, неполнофазные режимы, динамическая устойчивость

Компенсация поперечных емкостных параметров линий СВН осуществляется с помощью шунтирующих реакторов [1], устанавливаемых по концам линии (рис. 1,а). Шунтирующие реакторы (ШР), которыми оснащены электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН), в общем случае выполняют три важнейшие функции: компенсацию зарядной мощности в нормальных режимах, ограничение внутренних перенапряжений при вводе линии в работу и в аварийных режимах, а также снижение токов дуги подпитки для осуществления успешного ОАПВ при ликвидации наиболее вероятных однофазных дуговых КЗ [2]. Для решения последней задачи ШР дополняется компенсационным реактором, устанавливаемым в нейтрали [3]. В нормальных режимах этот реактор зашунтирован выключателем и вводится в работу в режиме паузы ОАПВ.

Степень поперечной компенсации за счет шунтирующих реакторов в линиях СВН определяется как

$$K_{\text{ком}} = Q_{\text{ШР}} / Q_{\text{зар}},$$

где  $Q_{\text{ШР}}$  - суммарная мощность ШР, установленных на линии;  $Q_{\text{зар}}$  - зарядная мощность линии:

$$Q_{\text{зар}} = 2 \frac{U_{\text{н.р}}^2}{Z_w} \text{tg} \frac{l}{2}.$$

Здесь  $U_{\text{н.р}}$  - наибольшее рабочее напряжение линии;  $Z_w, l$  - волновое сопротивление и электрическая длина линии.

A combined shunt compensation of overhead extra-high-voltage power lines is proposed, which contains, apart from traditional shunting reactors connected to the power line through reactor circuit breakers, reactors permanently connected to the line according to the star with nongrounded neutral configuration. The use of combined compensation makes it possible to exclude the occurrence of resonance overvoltages under incomplete-phase operating conditions, achieve more efficient suppression of arc in-feed currents during the single-phase autoreclosure dead time, and enhance the transient stability when clearing the most probable single-phase short-circuit faults in the cycle of single-phase autoreclosure.

Key words: overhead power lines, extra-high voltage, shunting reactor, incomplete-phase operating conditions, transient stability

В существующих сетях 500 и 750 кВ в нашей стране и за рубежом степень поперечной компенсации недостаточна и, как правило, не превышает 70%. Тогда как целесообразная степень компенсации в таких линиях должна приближаться к 100%.

Традиционной поперечной компенсации присущи, по крайней мере, три недостатка. Первый недостаток состоит в возможности появления резонансных повышений напряжения в неполнофазных режимах, что накладывает ограничение на число подключенных к линии ШР при её плановых и аварийных коммутациях [2].

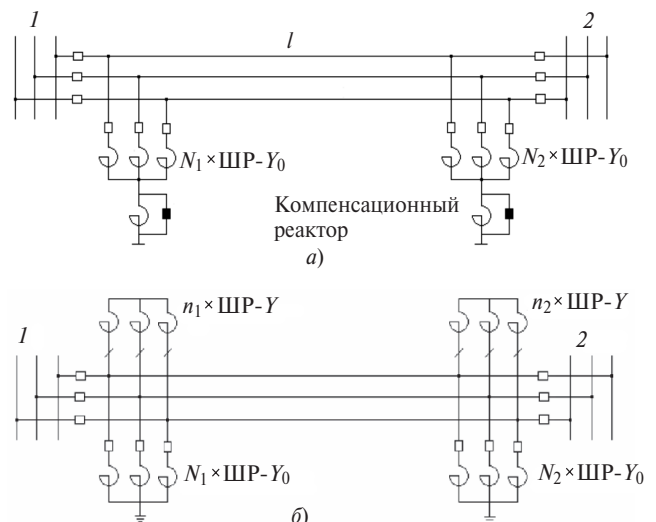


Рис. 1. Схема поперечной компенсации: а - традиционная; б - комбинированная

Второй недостаток связан с необходимостью коммутации реакторных выключателей для введения в работу всех шунтирующих реакторов в паузу ОАПВ для обеспечения условий гашения дуги подпитки, поскольку в нормальных режимах при передаче значительных мощностей шунтирующие реакторы, как правило, отключены от линии электропередачи реакторными выключателями по условиям режима напряжений. При этом отказ любой фазы одного из выключателей приводит к невозможности проведения ОАПВ, что усугубляет аварийную ситуацию и тем самым снижает надежность работы.

Третий недостаток состоит в том, что подключение шунтирующих реакторов при осуществлении ОАПВ приводит к понижению напряжения на шинах и соответственно снижает пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости.

Указанные недостатки традиционной схемы компенсации предлагается исключить за счет комбинированной поперечной компенсации (рис. 1, б), суть которой состоит в использовании незаземлённых шунтирующих реакторов, подключаемых по концам линии по схеме звезды с незаземленной нейтралью [4].

В дальнейшем традиционный ШР, нейтраль которого заземлена, будем обозначать как ШР- $Y_0$ , а предлагаемый ШР с незаземленной нейтралью как ШР- $Y$ .

Параметры незаземлённых реакторов ШР- $Y$  обеспечивают компенсацию межфазовых емкостей линии. В результате в цикле ОАПВ отпадает необходимость в использовании компенсационных реакторов. А для снижения тока дуги подпитки в паузу ОАПВ достаточно подключения лишь одной фазы ШР- $Y_0$ , одноименной с фазой, на которой произошло короткое замыкание (КЗ), в силу чего уровень напряжения на здоровых фазах не снижается. В предлагаемой схеме компенсации исключается также возможность возникновения резонансных повышений напряжения в неполнофазных режимах.

Мощность незаземлённого реактора ШР- $Y$  составляет ориентировочно 25% мощности основного ШР- $Y_0$ . А это означает, что установка таких реакторов будет соответствующим образом повышать степень компенсации линии, что благоприятно повлияет на работу существующих недокомпенсированных линий СВН.

Далее проводится сопоставительный анализ характерных режимов линий СВН при традиционной и комбинированной поперечной компенсации.

**Неполнофазные коммутации.** При неполнофазных включениях и отключениях линий с подклю-

ченными к ней традиционными шунтирующими реакторами ШР- $Y_0$  (рис. 2), что имеет место при отказах или больших разбросах в коммутации фаз выключателей, возможно появление резонансных перенапряжений на невключенных фазах.

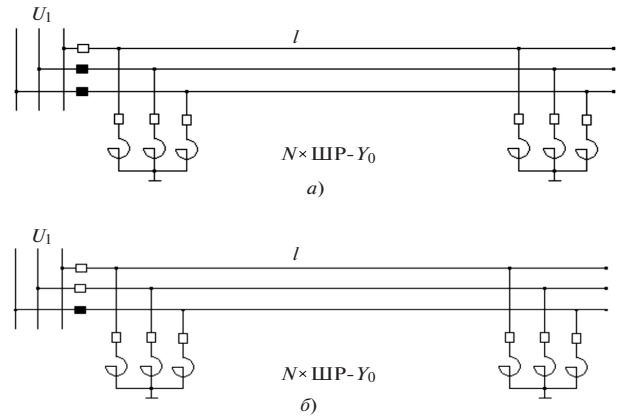


Рис. 2. Схема неполнофазной коммутации: а — с одной подключенной фазой; б — с двумя подключенными фазами

На рис. 3 приведены резонансные зоны для линий напряжением 500 кВ в зависимости от их длины и числа подключенных ШР- $Y_0$ . Как правило, при числе реакторов, требуемых по условию частичной или полной компенсации зарядной мощности линии, возможно появление резонансных перенапряжений. Данное обстоятельство вносит нежелательное ограничение на число подключаемых шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  к линии, особенно при аварийных коммутациях, когда с точки зрения ограничения перенапряжений или осуществления ОАПВ требуется определенное число подключенных к линии шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$ , которое неприемлемо по условию возникновения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах.

Оснащение линий незаземлёнными реакторами ШР- $Y$  позволяет создать безрезонансные зоны при  $U_{\text{нвк}}/U_1$

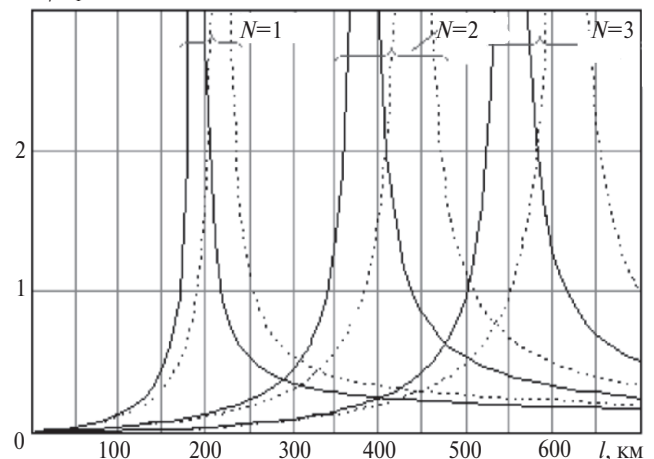


Рис. 3. Кривые напряжения на неподключенных фазах линии в режиме неполнофазного питания ВЛ 500 кВ

любом числе подключенных к линии традиционных шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$ . На рис. 4,б показана безрезонансная зона для случая оснащения линии 500 кВ двумя незаземлёнными реакторами ШР- $Y$ .

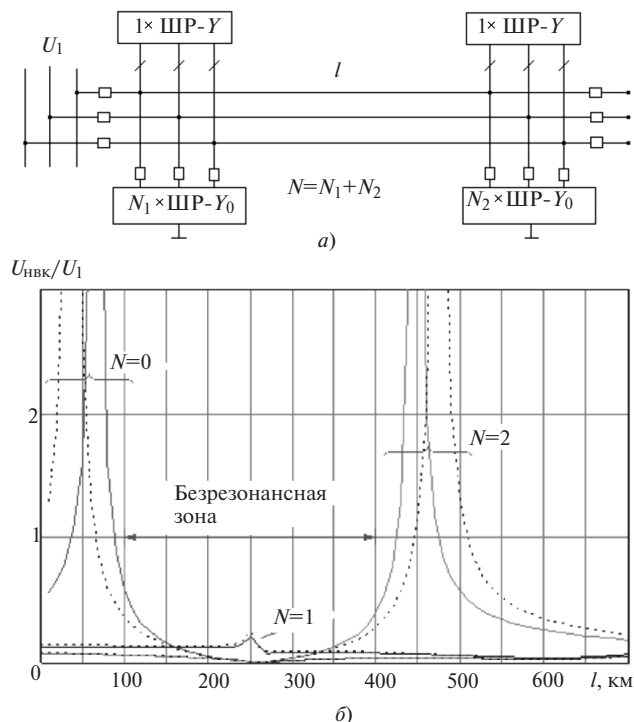


Рис. 4. Расчетная схема (а) при создании безрезонансной зоны (б) при установке двух незаземленных реакторов

В общем случае при заданной длине линии всегда может быть определено необходимое число незаземлённых реакторов ШР- $Y$ , так чтобы исключить резонансные явления при любом числе подключенных традиционных шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$ .

**ОАПВ при традиционной и комбинированной компенсации.** Для ликвидации повреждений на ВЛ СВН широко используется ОАПВ. Преимуществом ОАПВ по сравнению с ТАПВ является то, что коммутируется лишь аварийная фаза, а по «здоровым» фазам передача мощности сохраняется, что повышает уровень динамической устойчивости. Особенно это важно при больших нагрузках электропередачи.

В нормальных режимах при передаче значительных мощностей шунтирующие реакторы ШР- $Y_0$ , как правило, отключены от линии электропередачи реакторными выключателями по условиям режима напряжений. Для обеспечения условий успешного гашения дуги подпитки необходимо ввести в работу шунтирующие реакторы и компенсационные реакторы в их нейтралях, что связано с коммутацией большого числа фаз выключателей (рис. 5,а). При этом отказ любой фазы одного из выключателей

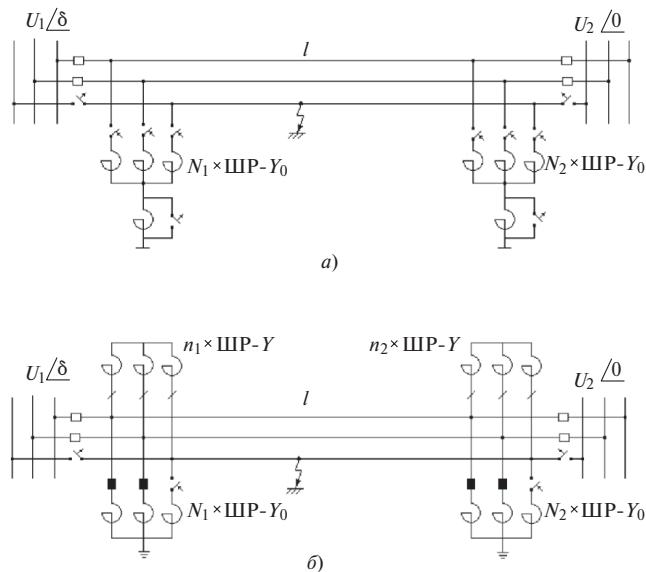


Рис. 5. Схема осуществления ОАПВ в линии СВН: а – при традиционной компенсации; б – при комбинированной

приводит к невозможности проведения ОАПВ, что усугубляет аварийную ситуацию и тем самым снижает надежность работы.

Кроме того, следует иметь в виду, что компенсационный реактор, включаемый в нейтраль шунтирующего реактора ШР- $Y_0$ , обеспечивает снижение во время паузы ОАПВ составляющей тока подпитки, обусловленной электростатическими связями между поврежденной и рабочими фазами линии, и оказывает неблагоприятное влияние на ограничение составляющей тока подпитки, вызванной электромагнитными связями между поврежденной и рабочими фазами в силу того, что уменьшается примерно на четверть проводимость шунтирующего реактора ШР- $Y_0$  на землю из-за включения в его нейтраль компенсационного реактора. В то же время в процессе динамического перехода в паузу ОАПВ происходит увеличение угла между ЭДС примыкающих систем и, соответственно, в токе дуги подпитки определяющей становится электромагнитная составляющая.

При комбинированной поперечной компенсации ОАПВ коренным образом упрощается (рис. 5,б). Постоянно подключенные к линии незаземленные реакторы ШР- $Y$  обеспечивают автоматическое ограничение электростатической составляющей тока дуги подпитки, а для снижения электромагнитной составляющей достаточно подключения реакторным выключателем лишь одной фазы шунтирующего реактора ШР- $Y_0$ , одноименной с фазой линии электропередачи, на которой произошло короткое замыкание.

В табл. 1 приведены характерные параметры ОАПВ для линии 750 кВ длиной 450 км для случаев традиционной и комбинированной поперечной

Таблица 1

Вид компенсации	Характерные параметры ОАПВ							
	ШР- $Y_0$		ШР- $Y$		Степень компенсации, %	Ток дуги подпитки* $A_{max}$		Длительность паузы ОАПВ, с
	$N_1$	$N_2$	$n_1$	$n_2$		$d=0$	$d=60^\circ$	
Без компенсации	—	—	—	—	—	115/115	213/198	Дуга не гаснет
Традиционная	1	1	—	—	57	60/60	92/83	i 3
	2	1	—	—	85	35/34	70/31	i 1,5
	2	2	—	—	113	10/10	24/24	i 0,5
Комбинированная	1	1	2	2	85	4/4	28/25	i 0,5

\* Значение в числителе соответствует ОКЗ в начале линии, в знаменателе — в конце.

компенсации. Необходимая длительность паузы ОАПВ в зависимости от значения тока дуги подпитки определялась согласно опытным данным [2].

При традиционной компенсации в случае установки двух шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$ , дающих 57%-ю степень компенсации, длительность паузы ОАПВ будет составлять более 3 с, что является неприемлемым по условию динамической устойчивости. Установка трех шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  обеспечивает продолжительность паузы ОАПВ порядка 1,5 с. И лишь при четырех шунтирующих реакторах ШР- $Y_0$  при степени компенсации 113% длительность паузы ОАПВ будет на уровне 0,5 с.

При комбинированной поперечной компенсации успешное гашение дуги подпитки при длительности паузы ОАПВ порядка 0,5 с требует установки меньшей суммарной мощности шунтирующих реакторов (два традиционных шунтирующих реактора ШР- $Y_0$  и четыре незаземлённых реактора ШР- $Y$  дают 85%-ю степень компенсации).

**Оценка пропускной способности электропередачи по условию динамической устойчивости.** Проведем оценку пропускной способности по условию динамической устойчивости электропередач с традиционной и комбинированной поперечной компенсацией на примере схемы выдачи мощности электростанции с помощью двух электропередач напряже-

нием 750 кВ по разным направлениям (рис. 6,а). Приемные системы для простоты считаются шиной бесконечной мощности. В качестве расчетной аварийной ситуации принимается однофазное КЗ в начале линии 1–2 и его ликвидация в цикле ОАПВ. В случае традиционной компенсации на линии установлены три шунтирующих реактора ШР- $Y_0$ , а при комбинированной компенсации линия оснащается двумя шунтирующими реакторами ШР- $Y_0$  и четырьмя незаземлёнными реакторами ШР- $Y$ . В обоих случаях имеет место 85%-я степень компенсации зарядной мощности. В нормальных режимах при передаче максимальной мощности шунтирующие реакторы ШР- $Y_0$  отключены от линии. При осуществлении ОАПВ линии с традиционной компенсацией отключенные шунтирующие реакторы ШР- $Y_0$  должны подключаться к линии, что должно приводить к снижению угловой характеристики электростанции примерно на 10% по сравнению со случаем комбинированной компенсации, когда в паузу ОАПВ подключаются лишь шунтирующие реакторы к аварийной фазе.

На рис. 6,б показан характерный динамический переход при принятой расчетной аварии. В табл. 2 приведены результаты расчетов максимальной передаваемой мощности по условию динамической устойчивости при ОАПВ ВЛ 1–2. При традиционной компенсации со степенью 85% и, соответст-

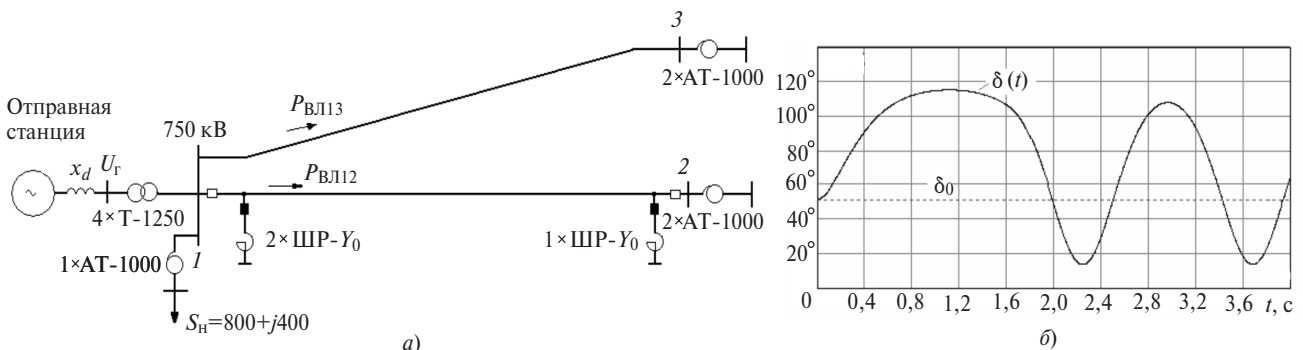


Рис. 6. Оценка пропускной способности по условию динамической устойчивости: а – расчетная схема; б – динамический переход при однофазном КЗ (0,12 с) и успешном ОАПВ (1,5 с) линии 1–2

венно, длительности паузы ОАПВ 1,5 с максимальной передаваемая мощность каждой из электропередач при их равной нагрузке составила 1470 МВт.

Таблица 2

Вид компенсации	Длительность паузы ОАПВ, с	Мощность, МВт	
		$P_{ВЛ-3}$	$P_{ВЛ-2}$
Традиционная	1,5	1470	1470 (100 %)
Комбинированная	1,5	1470	1750 (119 %)
	0,5	1470	1880 (128 %)

Для оценки степени повышения передаваемой мощности в случае комбинированной компенсации осуществлялась дополнительная нагрузка ВЛ 1–2, пока не происходило нарушение динамической устойчивости электростанции. При длительности паузы ОАПВ 1,5 с повышение передаваемой мощности по условию динамической устойчивости составило 119%, а при паузе ОАПВ 0,5 с, что позволяет при 85%-й степени комбинированной компенсации, 128%.

**Выводы.** 1. Использование комбинированной компенсации позволяет исключить резонансные перенапряжения при неполнофазных режимах при любом числе подключенных к линии традиционных шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  и тем самым снять ограничение на число подключенных к линии шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  при её плановых и аварийных коммутациях, имеющее место при традиционной компенсации.

2. В случае комбинированной компенсации резко упрощается ОАПВ в линиях СВН. Во-первых, отпадает необходимость в компенсационных реакторах, включаемых в нейтраль шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  при традиционной компенсации. Во-вторых, для необходимого снижения тока дуги подпитки достаточно подключения лишь одной фазы шунтирующих реакторов ШР- $Y_0$  (отключенных по условиям нормального режима), одноименной с фазой линии, на которой произошло КЗ. В то время как при традиционной компенсации не-

обходимо подключать все три фазы, что приводит к понижению напряжения на шинах и, соответственно, снижает уровень динамической устойчивости. При одинаковой степени компенсации комбинированная компенсация позволяет более эффективно снижать токи дуги подпитки и, соответственно, иметь меньшую длительность паузы ОАПВ.

3. Комбинированная компенсация позволяет повысить уровень динамической устойчивости на 20–30% при ликвидации наиболее вероятных однофазных КЗ в цикле ОАПВ в линиях СВН.

4. Для внедрения комбинированной компенсации в эксплуатируемых и намечаемых к сооружению электропередачах СВН требуется, в первую очередь, создание опытно-промышленного образца реактора с незаземленной нейтралью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330–500 кВ. – М.: Энергия, 1974.
2. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения/Под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993.
3. Беляков Н.Н., Рашкес В.С., Рожавская С.Н. Использование компенсационных реакторов для облегчения условий ОАПВ на высоковольтных линиях. – Электрические станции, 1975, №12.
4. Патент РФ № 2351050. Устройство поперечной компенсации для линии электропередачи/С.М. Зильберман, Т.Г. Красильникова, Г.И. Самородов. – БИ, 2009, №9.

[20.12.10]

*Авторы: Зильберман Самуил Моисеевич окончил в 1968 г. электроэнергетический факультет Красноярского политехнического института. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии». Генеральный директор МЭС Сибири.*

*Красильников Евгений Николаевич окончил в 1987 г. электроэнергетический факультет Новосибирского электротехнического института. Генеральный директор ЗАО «СИБЭЛ».*