

Н.Г. Иванов, М.И. Александрова, Е.С. Воробьев,
В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АПВ*

Введение

В паузе цикла автоматического повторного включения (АПВ) протяженная ЛЭП с шунтирующими реакторами (ШР) образует высокодобротный колебательный контур, в котором к моменту повторного включения продолжается колебательный разряд распределенной ёмкости ЛЭП через реакторы. Повторное включение «заряженной» линии в произвольный момент времени может привести к опасным для изоляции коммутационным перенапряжениям в сети. Одним из эффективных способов снижения этих перенапряжений является применение технологии интеллектуального АПВ [1, 2, 3]. Идея этой технологии состоит в управлении моментом повторного включения ЛЭП с целью снижения интенсивности электромагнитного переходного процесса, вызывающего перенапряжения.

Теоретические вопросы интеллектуального АПВ подробно рассмотрены в [2] на примере двухпроводной ЛЭП с ШР. В настоящей работе развиваются идеи работы [2] для режима трёхфазного интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с ШР.

Особенности трёхфазного АПВ

Исследование переходных процессов при повторном включении ЛЭП [2] показало, что интенсивность переходного процесса определяется параметрами напряжения на контактах выключателя в момент включения. Это напряжение в паузе АПВ имеет форму биений, и поэтому оптимальной стратегией повторного включения каждой фазы ЛЭП будет включение в момент перехода кривой

* Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15030ГУ/2020).

напряжения на контактах выключателя фазы через нуль вблизи минимума биений (огibaющей) этого напряжения.

Есть ещё одна особенность трёхфазного повторного включения линии. Она заключена в процессах, происходящих при предшествующем АПВ отключении ЛЭП. Необычность этих процессов, вызванных разрядом распределённой ёмкости ЛЭП на шунтирующие реакторы, состоит в несимметричности начальных условия, если отключению предшествует несимметричный режим линии (например, несимметричное короткое замыкание). В этом случае разряд ёмкостей происходит одновременно в схемах всех последовательностей. Поскольку характеристические параметры схем последовательностей различны – параметры схем прямой и обратной последовательности, будучи одинаковыми, отличаются от параметров схемы нулевой последовательности, главным образом из-за разницы в распределённой ёмкости линии, – то комплексные частоты составляющих свободных процессов в этих схемах так же отличаются: частота свободной составляющей нулевой последовательности выше частоты составляющей в схеме прямой последовательности на 4–13 % [4].

Из-за несимметричности напряжения со стороны ЛЭП в момент включения минимумы огibaющих напряжения на контактах выключателя в фазах наступают не одновременно, причем временной интервал между ними может достигать сотен микросекунд. Затягивание процесса включения фаз в цикле АПВ недопустимо по условию сохранения динамической устойчивости и из-за опасности возникновения резонансных перенапряжений в линии в неполнофазных режимах.

Есть ещё один довод в пользу незамедлительного повторного включения остальных фаз ЛЭП сразу же после включения первой фазы. Дело в том, что переходный процесс в линии, возникающий при включении любой из фаз, искажает кривые напряжения ЛЭП в оставшихся фазах. Это нарушает сценарий включения остальных фаз, смещая переходы через нуль кривых напряжений на контактах ещё не включенных выключателей относительно предсказанных в паузе цикла АПВ моментов (рис. 1). Ошибка предсказания растет с увеличением интервала времени между моментами включениями фаз. Попытка учесть влияние переходного процесса от коммутации первой фазы при

предсказании кривых напряжения второй и третьей фаз ЛЭП сильно усложняет процедуру управляемой коммутации, и поэтому разумной стратегией при трёхфазном АПВ считается выбор моментов повторного включения второй и третьей фаз как можно ближе к моменту включения первой фазы [5].

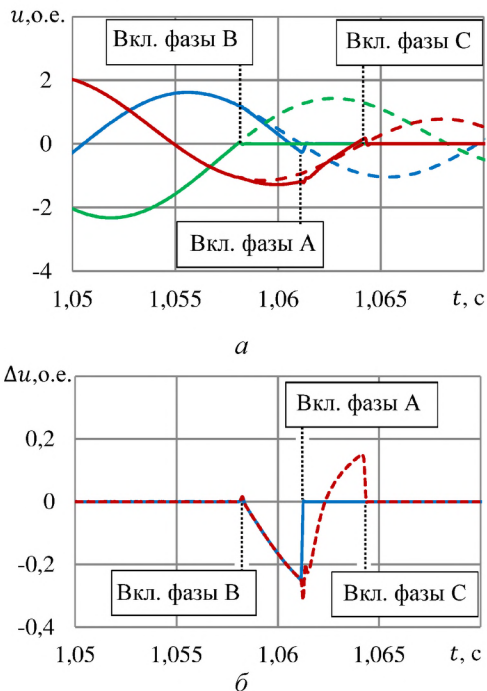


Рис. 1. Предсказанные (пунктирные линии) и фактические (сплошные линии) кривые напряжения на контактах выключателя фаз (а) и ошибки предсказания напряжений фаз А (сплошная линия) и С (пунктирная линия), вызванные поочередным включением фаз (б) в последовательности В-А-С

Стратегия интеллектуального трёхфазного АПВ

Известная стратегия интеллектуального АПВ [5] основана на выборе порядка включения фаз специальным образом. Принимается во внимание, что, с одной стороны, наибольшее отклонение от оптимальности будет при включении третьей фазы, а с другой стороны, – минимальные перенапряжения даже при

отклонении момента включения от оптимального будут в фазе с наименьшим уровнем огибающей напряжения на контактах выключателя. Поэтому сначала по предсказанным кривым напряжений на контактах выключателей фаз находят точку перехода через нуль, соответствующую наименьшей из огибающих всех фаз, и выбирают эту точку за момент включения третьей фазы. За моменты включения двух других фаз выбирают ближайшие моменты перехода соответствующих кривых напряжения на контактах выключателя через нуль, располагающиеся слева на временной оси от момента включения третьей фазы.

Хотя описываемая стратегия позволяет уменьшить взаимное влияние фаз при включении, но в ней не учитываются величины огибающих в первой и во второй включаемых фазах. В то же время величины огибающих в момент включения могут быть значительными, и, согласно [2], даже включение первой и второй фазы строго в точке перехода кривой напряжения на выключателе через нуль всё ещё может вызывать интенсивный переходный процесс и перенапряжения.

Дальнейшее повышение эффективности интеллектуального АПВ невозможно без одновременного учета взаимного влияния фаз при последовательном их включении и уровней огибающей напряжения на контактах выключателя в каждой фазе. В усовершенствованной стратегии трёхфазного интеллектуального АПВ благодаря учету величин огибающей удастся существенно снизить максимальный уровень перенапряжений, особенно в условиях разброса времени действия выключателя.

Результативность новой стратегии исследовалась на модели реальной ЛЭП 500 кВ протяженностью 432 км. Степень компенсации зарядной мощности ЛЭП варьировалась от 0,25 до 1,5, моделировались все виды КЗ.

На ЛЭП, не оснащенной ОПН, уровень коммутационных перенапряжений достигает 3,87 крат от номинального значения, существенно превышая допустимый уровень коммутационных перенапряжений оборудования сети (кривая 1 на рис. 2). ОПН с защитным уровнем 2,0 о.е., установленные по концам линии, позволяют ограничить перенапряжения до 2,38 о.е. (кривая 2).

Технология интеллектуального АПВ демонстрирует лучшую эффективность смягчения перенапряжений на линии по сравнению

с применением для этих же целей ОПН даже в условиях разброса времени действия выключателя (кривые 3, 3', 4 и 4'). Новая стратегия эффективнее стратегии из работы [5] как в случае идеального выключателя (максимальные перенапряжения 1,67 о.е. против 1,75 о.е., кривые 3 и 4 на рис. 2), так и в случае выключателя с разбросом времени действия (максимальные перенапряжения 1,88 о.е. и 2,0 о.е. соответственно, кривые 3' и 4').

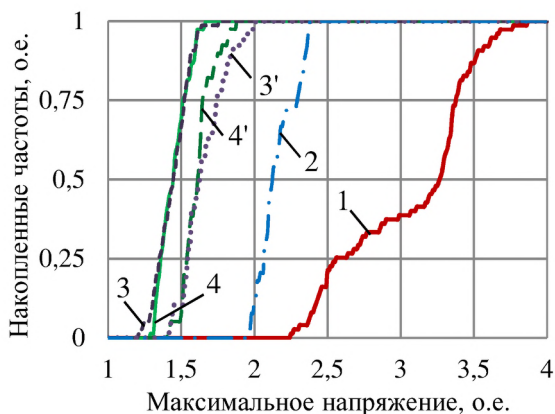


Рис. 2. Кумулятивные кривые максимальных напряжений при трёхфазном АПВ ЛЭП с ШР (номинальное напряжение 500 кВ, длина 432 км): на максимуме напряжения на контактах выключателя (кривая 1) на ЛЭП без ОПН; на ЛЭП с ОПН с защитным уровнем 2,0 о.е. (кривая 2); при трёхфазном интеллектуальном АПВ по алгоритму из работы [5] (кривые 3 и 3') и по новой стратегии (кривые 4' и 4) с учетом разброса времени действия выключателя в 1 мс и без разброса (номинальное напряжение 500 кВ, длина 432 км)

Выводы

Теоретически лучшей стратегией интеллектуального трёхфазного АПВ ЛЭП с шунтирующими реакторами является последовательное включение фаз в окрестности перехода кривой напряжения включаемой фазы через нуль. Однако включение уже первой фазы приводит к нарушению условий оптимальности включения остальных фаз из-за возникающего переходного процесса в линии. Поэтому при выборе моментов повторного включения фаз в цикле интеллектуального трёхфазного АПВ должен учитываться эффект взаимного влияния фаз при их поочередном включении. Предлага-

емая стратегия трёхфазного интеллектуального АПВ нивелирует влияние переходных процессов от предыдущих коммутации фаз путем выбора момента включения фазы линии с учетом уровней всех огибающих напряжений на контактах выключателей фаз, обеспечивая лучшую эффективность снижения коммутационных перенапряжений даже в случае существенного разброса времени действия выключателя.

Литература

1. Insulation Coordination for UHV AC Systems // CIGRE TB542, Working Group C4.306. June, 2013. – 289 p.

2. *Ivanov N.G.* Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / *Ivanov N.G.*, et al. // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 8. – PP. 558–564.

3. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и её приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 333 с.

4. *Беляков Н.Н.* Способ ограничения перенапряжений при повторных включениях линий электропередач / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес // Электричество. – 1975. – № 2. – С. 22–28.

5. *Pilz G.* An Algorithm for Three-Pole Controlled Auto-Reclose of Shunt Compensated Transmission Lines With a Optimization for The Second and Third Pole / *G. Pilz*, et al. // CIGRE A3-115 Session. – 2004. – PP. 1–8.

В.С. Петров, Алексей О. Фёдоров, В.А. Егоров
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

СПОСОБ ОДНОСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Все способы пассивного одностороннего волнового определения места повреждения (ВОМП) основаны на фиксации времени t_1 первого прихода на подстанцию волны, вызванной повреждением, и времени t_3 , при котором данная волна, отразив-