

Влияние параметров КЛ ВН и СВН с изоляцией из сшитого полиэтилена на уровни токов короткого замыкания в энергосистемах

Халилов Ф.Х., главный научный сотрудник СПбГПУ, действительный член Академии электротехнических наук РФ, доктор технических наук, профессор.
Кузнецов Д.В., инженер I категории ОАО «СевЗапНТЦ»

В настоящее время в электроэнергетических сетях крупных городов и промышленных центров активно применяются кабельные линии высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН) с изоляцией из сшитого полиэтилена, в том числе в качестве внутрисистемных связей. Это связано со специфическими условиями внутри крупных городов такими как: высокая плотность застройки, сокращение свободных площадей внутри города, связанное с развитием его инфраструктуры, повышенными требованиями к электромагнитной совместимости электрических сетей высокого напряжения с установками техносферы и коммуникационными сетями и т. д. Отмеченное происходит, несмотря на то, что стоимость строительства кабельной линии соответствующего класса напряжения по сравнению с равной ей по передаваемой мощности воздушной линией приблизительно в 15-18 раз больше. Однако, меньшая площадь трассы кабельной линии, ее большая надежность в сравнении с воздушной линией (при выполнении всех необходимых условий по выбору необходимых кабелей для передачи требуемой мощности на стадии проектирования и соблюдения технологии прокладки на стадии монтажа), а также, что немаловажно для городских условий, отсутствие опор и висящих проводов определяют широкое внедрение кабельных линий высоких и средних классов напряжений в энергосистемы крупных городов.

В то же время современные электроэнергетические системы крупных городов характеризуются высокими плотностями нагрузок и генерации, существенно возрастающими в ближайшие годы. Схемы электрических сетей мегаполисов, как правило, имеют сложноразветвленный характер с большим числом крупных узловых подстанций, связанных достаточно «короткими» связями с крупными объектами генерации. Естественно, что в условиях таких систем наблюдается значительный рост уровней токов короткого замыкания в различных их точках, особенно на шинах узловых подстанций, имеющих, как правило, три номинальных напряжения, вблизи заземленных нейтралей мощных автотрансформаторов.

Как показывает многолетний опыт наблюдения за авариями в энергосистемах при эффективно за-

земленной нейтрали, подавляющее число коротких замыканий связано с замыканием одной фазы на землю, в то время как трехфазное короткое замыкание является достаточно редким [1]. Ориентировочно доля трехфазных коротких замыканий от их общего числа составляет 5%, в то время как доля однофазных — 65%. Кроме того, многочисленные расчеты и измерения токов коротких замыканий в современной энергосистеме, например, в системе Санкт-Петербурга, показывают, что токи однофазных коротких замыканий превышают, а иногда и значительно, токи трехфазных коротких замыканий. Это обстоятельство обуславливает определенные трудности при выборе оборудования и требует мер, направленных на снижение уровней токов коротких замыканий.

Используя известное правило эквивалентности прямой последовательности, возможно, оценить примерные пределы, в которых могут изменяться величины токов при несимметричных коротких замыканиях по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания. Такая оценка позволяет по известной для данной точки величине трехфазного короткого замыкания определить возможные значения тока при несимметричных коротких замыканиях для той же точки системы. Так, в первом приближении абсолютная величина отношения тока в месте любого (n) несимметричного металлического короткого замыкания ($I_k^{(n)}$) к току трехфазного короткого замыкания ($I_k^{(3)}$) чисто индуктивной схемы при тех же условиях можно записать [1]:

$$K_{(n-3)} = \frac{(I_k)^{(n)}}{(I_k)^{(3)}} = m^{(n)} \cdot \left[\frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \right] \cdot \frac{1}{1 + \left[\frac{(X_\Delta)^{(n)}}{X_{1\Sigma}} \right]}, \quad (1)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, зависящий от параметров схем обратной и нулевой последовательности; $(X_\Delta)^{(n)}$ — дополнительное сопротивление, величина которого для каждого вида короткого замыкания также определяется параметрами схем обратной и нулевой последовательности; $X_{1\Sigma}$ — результирующее сопротивление прямой последовательности.

Согласно этому выражению, так как суммарная реактивность нулевой последовательности $x_{0\Sigma}$ может изменяться в очень широких пределах (практически от 0 до ∞) и для точек системы, в которых $x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$, а также предполагая, что $E^n = E^3$, отношение $K_{(1-3)}$ находится в пределах от 0 до 1,5. При этом величина отношения $K_{(1-3)}$ в функции $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$ уменьшается с ростом последнего. При равенстве $x_{0\Sigma} = x_{1\Sigma}$ имеем равенство тока однофазного короткого замыкания току трехфазного короткого замыкания в той же точке. Соответственно при $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma} < 1$ ток однофазного короткого замыкания превышает ток трехфазного короткого замыкания. Таким образом, с ростом величины суммарного сопротивления схемы нулевой последовательности относительно места однократной поперечной несимметрии, которой является однофазное короткое замыкание, по сравнению с результирующим сопротивлением схемы прямой последовательности относительно той же точки рассматриваемой схемы, наблюдается снижение уровня токов однофазного короткого замыкания по отношению к трехфазному.

Оценим влияние параметров применяемых КЛ ВН и СВН в смешанных сетях энергосистем крупных городов на уровни токов короткого замыкания в них.

Известно, что наибольшее распространение получила однофазная конструкция кабелей с изоляцией из СПЭ. При этом кабельные линии с кабелями из СПЭ средних и высоких классов напряжения эксплуатируются с тремя возможными системами заземления экранов одножильных кабелей [2, 3].

Не будем здесь подробно останавливаться на особенностях того или иного способа заземления экранов одножильных кабелей, отметим лишь то, что при применении системы заземления экранов в двух точках существенно снижается их пропускная способность, что обусловливается наличием дополнительных потерь от протекания обратных продольных токов в экранах этих кабелей. В общем случае такое снижение может достигать до 40 %, а иногда и более, от номинальной пропускной способности этой же кабельной линии при двух других системах заземления экранов. В основном она применяется на коротких участках обычно длиной до 600 метров и при необходимости передачи сравнительно небольшой мощности порядка нескольких десятков МВА.

Рассмотрим влияние указанных выше систем заземления экранов одножильных силовых кабелей из СПЭ на погонные активно-индуктивные параметры и соотношения между ними современных кабельных линий на примере одноцепной кабельной линии напряжением 330 кВ при различных системах заземления экранов и различных способах прокладки по трассе КЛ из СПЭ.

Взаимное пространственное расположение одножильных кабелей из СПЭ в кабельных линиях различных классов напряжений обычно ограничивается двумя вариантами: 1) расположение фаз линии треугольником; 2) расположение фаз линии плоскостью с некоторым расстоянием между осями фаз. Каждый из вариантов соответствующим образом влияет на параметры кабельной линии и соответственно на ее режим. Так, например, при одном и том же сечении токопроводящей жилы и системе заземления экранов в одной точке при расположении фаз в плоскости пропускная способность линии будет в общем случае на 10-15% выше, чем при расположении их треугольником при прочих равных условиях, однако, при этом на разомкнутых концах экранов в основном при протекании токов несимметричных режимов наводятся значительные потенциалы, и при расположении фаз в плоскости их абсолютные величины будут намного превышать такие же потенциалы на разомкнутых концах при расположении фаз треугольником, что представляет собой особую проблему ограничения таких перенапряжений. Здесь отметим, что, как указано в [4], величина кратковременной электрической прочности в течении нескольких десятков секунд полиэтиленовой изоляции экрана кабеля составляет примерно 160 кВ. Таким образом, каждый раз при применении одножильных кабелей из СПЭ необходимо учитывать, кроме всего прочего, и их взаимное расположение друг относительно друга.

В таблице 1 приведены значения параметров погонных активно-индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей одноцепной трехфазной кабельной линии 330 кВ, состоящих из медных одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ различных сечений, при различных способах взаимного пространственного расположения фаз и различных способах заземления их экранов.

Расчеты параметров погонных сопротивлений линий проводились в соответствии с методами, изложенными в [2] и [3]. Сечения медных токопроводящих жил принимались с учетом их значений, выпускаемых зарубежной и отечественной промышленностью. Величины сечений проводящих медных экранов одножильных кабелей из СПЭ принимались равными 240 мм².

При расположении фаз кабельной линии треугольником в настоящих расчетах подразумевалось, что кабели касаются друг друга. Для расположения фаз плоскостью принималось, что оси соответствующих фаз расположены на расстоянии в два наружных диаметра кабеля, такое положение соответствует наиболее распространенному в практике проектирования кабельных линий, состоящих из одножильных кабе-

Таблица 1. Погонные активно-индуктивные сопротивления для токов прямой и нулевой последовательности в одноцепных трехфазных кабельных линиях 330 кВ с изоляцией из СПЭ

Сечение токоведущей жилы, мм ²	Сопротивление прямой последовательности ($R_1 + jX_1$), $\cdot 10^{-4}$ Ом/м			Сопротивление нулевой последовательности ($R_0 + jX_0$), $\cdot 10^{-4}$ Ом/м		
	Экран заземлен в одной точке	Экран заземлен в двух точках	Экран транспонирован	Экран заземлен в одной точке	Экран заземлен в двух точках	Экран транспонирован
Фазы линии расположены треугольником						
630	4,05-0,1+j-1,23	6,473-0,1+j-1,08	4,05-0,1+j-1,23	1,885+j-1,869-10	1,274+j-7,307-0,1	1,177+j-7,219-0,1
1000	2,891-0,1+j-1,119	5,26-0,1+j-9,474-0,1	2,891-0,1+j-1,119	1,177+j-1,848-10	1,158+j-6,28-0,1	1,062+j-6,191-0,1
1200	2,089-0,1+j-1,064	4,63-0,1+j-9,018-0,1	2,089-0,1+j-1,064	1,689+j-1,831-10	1,079+j-5,467-0,1	9,816-0,1+j-5,378-0,1
1600	1,664-0,1+j-9,713-0,1	3,96-0,1+j-8,348-0,1	1,664-0,1+j-9,713-0,1	1,647+j-1,818-10	1,04+j-4,915-0,1	9,431-0,1+j-4,825-0,1
2000	1,415-0,1+j-9,45-0,1	3,688-0,1+j-8,111-0,1	1,415-0,1+j-9,45-0,1	1,622+j-1,81-10	1,018+j-4,686-0,1	9,231-0,1+j-4,597-0,1
2500	1,235-0,1+j-8,944-0,1	3,489-0,1+j-7,628-0,1	1,235-0,1+j-8,944-0,1	1,604+j-1,789-10	1,005+j-4,208-0,1	9,109-0,1+j-4,119-0,1
3000	1,116-0,1+j-8,667-0,1	3,339-0,1+j-7,387-0,1	1,116-0,1+j-8,667-0,1	1,592+j-1,778-10	9,985-0,1+j-3,975-0,1	9,049-0,1+j-3,885-0,1
Фазы линии расположены в плоскости с расстоянием между осями жил $2D_k$						
630	9,913-0,1+j-1,811	9,357-0,1+j-1,114	1,273+j-1,857	2,753+j-1,865-10	2,363+j-8,119-0,1	2,263+j-8,003-0,1
1000	2,693-0,1+j-1,7	8,107-0,1+j-1,012	7,818-0,1+j-1,821	2,262+j-1,823-10	1,833+j-6,998-0,1	1,772+j-6,928-0,1
1200	2,037-0,1+j-1,645	9,71-0,1+j-1,044	3,939-0,1+j-1,651	1,874+j-1,785-10	1,484+j-5,632-0,1	1,386+j-5,515-0,1
1600	1,59-0,1+j-1,552-0,1	8,437-0,1+j-9,888-0,1	1,753-0,1+j-1,564-0,1	1,753+j-1,759-10	1,396+j-4,946-0,1	1,294+j-4,817-0,1
2000	1,327-0,1+j-1,526	7,296-0,1+j-9,475-0,1	1,595-0,1+j-1,493	1,64+j-1,721-10	1,339+j-4,34-0,1	1,19+j-4,144-0,1
2500	1,131-0,1+j-1,475	6,705-0,1+j-8,498-0,1	1,145-0,1+j-1,354	1,595+j-1,697-10	1,332+j-3,251-0,1	1,174+j-3,036-0,1
3000	1,003-0,1+j-1,447	6,439-0,1+j-8,593-0,1	1,017-0,1+j-1,337	1,582+j-1,684-10	1,327+j-3,344-0,1	1,017+j-3,141-0,1

лей с изоляцией из сшитого полиэтилена, способу расположения фаз при прокладке линий плоскостью.

Активные сопротивления токопроводящей жилы, соответствующего сечения, а также активные сопротивления экранов по прямой и нулевой последовательностям, приведенные в таблицах, соответствуют начальному значению возникновения короткого замыкания при предположении, что кабель работал в предыдущем режиме с номинальной нагрузкой при максимально-допустимой температуре токопроводящей жилы для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена равной 90 °С. Расчет указанных выше сопротивлений проводился согласно [2] также с учетом влияния эффекта близости и поверхностного эффекта. Удельное сопротивление земли принималось равным 100 Ом/м.

Как видно из таблицы 1, с увеличением сечений токопроводящих жил кабелей все сопротивления соответственно снижаются, при этом активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности для транспозиции экранов и заземления их в одной точке совпадают. Активное сопротивление прямой последовательности для системы заземления экранов в двух точках заметно больше таковых для двух других систем заземления экранов, что обуславливается наличием дополнительных потерь в экранах кабелей. Для индуктивных сопротивлений имеем обратное отношение. Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности заметно отличаются от

тех же сопротивлений прямой последовательности, что объясняется различием путей прохождения токов прямой и нулевой последовательностей. По результатам данных таблиц видно выполнение следующих закономерностей: 1) при токе прямой (обратной) последовательности взаимная индукция с другими фазами кабельной линии уменьшает сопротивление фазы; 2) при токе нулевой последовательности взаимная индукция с другими фазами кабельной линии увеличивает сопротивление фазы.

Активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности систем заземления экранов в одной точке больше, чем активное и индуктивное сопротивление той же последовательности для системы заземления экранов в двух точках, в свою очередь последние незначительно больше идентичных параметров для транспозиции экранов. Такая закономерность наблюдается во всем диапазоне значений токопроводящих жил.

Из данных таблицы 1 также следует, что сопротивления кабельных линий 330 кВ в общем случае необходимо вводить в схемы соответствующих последовательностей своими полными сопротивлениями. При этом если расчет соответствующего режима не ограничивается только нахождением начального значения периодической слагающей тока короткого замыкания, то необходимо учитывать, строго говоря, тепловой спад тока короткого замыкания. Соответственно, он тем интенсивнее, чем больше плотность

тока и продолжительность короткого замыкания, а также чем большую долю составляет активное сопротивление данного проводника от общего сопротивления цепи короткого замыкания.

Особое внимание обращает на себя влияние способов заземления экранов кабелей на индуктивное сопротивление нулевой последовательности кабельной линии при двух вариантах взаимного расположения фаз линии. Видно, что индуктивные сопротивления нулевой последовательности линий систем заземления экранов кабелей в одной точке при прочих равных условиях значительно превышают таковые для систем заземления экранов в двух точках и транспозиции. Это превышение больше при расположении фаз кабельной линии треугольником. Это объясняется тем, что для систем заземления экранов кабелей в одной точке отсутствует путь циркуляции токов нулевой последовательности в экранах, а значит, экраны кабелей не влияют при этой системе заземления на сопротивление нулевой последовательности линии, в этом случае оно определяется суммой собственного сопротивления токопроводящей жилы с удвоенным значением взаимного сопротивления жилы с соседними кабелями. Отсюда следует вывод, что при расположении фаз кабельной линии треугольником взаимная индукция между его фазами выше, чем при расположении в плоскости, а следовательно выше и сопротивление линии в целом. При заземлении экранов в двух точках и их транспозиции в экранах создаются пути для протекания токов нулевой последовательности, а значит, заземленные экраны снижают сопротивление нулевой последовательности линии.

В таблице 2 приведены отношения $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$ в зависимости от сечения токопроводящих жил кабелей из СПЭ одноцепной трехфазной кабельной линии 330 кВ в случае различных способов заземления экранов кабелей при расположении фаз линии треугольником и плоскостью, соответственно.

Принципиально для погонных активно-индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательности одноцепных трехфазных кабельных линий ВН и СВН, состоящих из одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ, сохраняются основные закономерности, полученные при рассмотрении погонных активно-индуктивных сопротивлений кабельных линий 330 кВ.

В заключение следует отметить то обстоятельство, что при заземлении экранов однофазных кабелей 330 кВ соответствующих трехфазных кабельных линий наблюдается наибольшая величина отношения $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$, составляющая в среднем значение около 19, причем с ростом сечения токопроводящей жилы величина указанного соотношения увеличивается. При других систе-

Таблица 2. Отношение индуктивных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$ в одноцепных трехфазных кабельных линиях 330 кВ с изоляцией из СПЭ

Сечение токо- проводящей жилы	$x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$		
	Экран заземлен в одной точке	Экран заземлен в двух точках	Экран транспонирован
Фазы линии расположены треугольником			
185	15,20	0,68	0,59
300	16,51	0,64	0,55
630	17,21	0,61	0,51
1000	18,72	0,59	0,50
1600	19,15	0,58	0,49
2500	20,00	0,55	0,46
3000	20,51	0,54	0,45
Фазы линии расположены в плоскости			
185	9,68	0,66	0,40
300	10,19	0,62	0,37
630	10,43	0,59	0,33
1000	10,97	0,56	0,31
1600	11,10	0,55	0,30
2500	11,34	0,52	0,28
3000	11,49	0,51	0,27

мах заземления экранов кабелей данное соотношение значительно меньше единицы и с увеличением сечения токопроводящей жилы наблюдается его снижение.

Таким образом, наиболее приемлемым с точки зрения обеспечения минимальной величины токов однофазных коротких замыканий на землю в системах с эффективно заземленной нейтралью, в которых используются однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, по сравнению с трехфазными токами коротких замыканий является вариант заземления экранов таких кабелей в одной точке.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: Энергия, 1970.
2. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования», СПб, 2008 г.
4. Кузнецов Д.В., Монастырский А.Е., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. Проблемы защиты кабеля 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена от перенапряжений // Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности, 24.09-26.09.2008. Санкт-Петербург. СПб.: Тип. ВИТУ. 2008. С. 57-60