

УДК 621.313.314.21.048

ОСОБЕННОСТИ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ

**Докт. техн. наук, проф. СТЕПАНЧУК К. Ф.,
кандидаты техн. наук, доценты КЛИМОВИЧ Г. С., КРАСЬКО А. С.**

Белорусская государственная политехническая академия

Для повышения надежности местных сетей 10—20 кВ в ряде стран при строительстве воздушных линий применяют изолированные или покрытые провода, которые представляют собой сталеалюминиевые или алюминиевые провода с уплотненной жилой, покрытые слоем полимерной изоляции, толщиной 2—3 мм.

В Республике Беларусь налажен выпуск проводов АСИПП с покрытием модифицированным полиэтиленом. Испытания, проведенные в лаборатории ТВН БГПА, показали, что покрытие этих проводов выдерживает испытательные напряжения по нормам для оборудования 10 кВ. По этим параметрам отечественные провода не уступают зарубежным. Это позволяет существенно уменьшить габариты ВЛ без снижения электрической прочности и грозоупорности [1].

Опыт эксплуатации линий с покрытыми проводами (ВЛП) показал, что на них чаще, чем на линиях с голыми проводами, происходит повреждение проводов с падением их на землю. Основной причиной обрыва провода считают его разрушение дугой сопровождающего тока после грозового перекрытия.

Механизм разрушения сводится к следующему [2, 3]. При покрытых проводах импульсный разряд сопровождается разрушением изолирующего покрытия и место горения дуги фиксируется на проводе. В результате провод повреждается термическим воздействием дуги вплоть до полного разрушения. Обычная защита от коротких замыканий не может защитить провод.

Для защиты провода от пережога при импульсном перекрытии изоляции на опоре в месте крепления его к изолятору с провода снимают изолирующее покрытие или наматывают голый провод, соединенный электрически с основным, и устанавливают защитную арматуру в виде рогов или металлических деталей другой формы. В этом случае дуга сопровождающего тока переходит на защитную арматуру и удаляется от поверхности провода. Для предупреждения разряда и возникновения дуги сопровождающего тока в середине пролета, где защитную арматуру установить нельзя, должны быть скоординированы изоляция на опоре,

междуфазное расстояние и длина пролета. В этом и состоит особенность грозозащиты ВЛП.

Все ВЛ 6—10 кВ в РБ построены или строятся для работы в режиме с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через настроенную индуктивность. В этом режиме ток однофазного замыкания на землю составляет единицы ампер и искра при однофазном перекрытии самоликвидируется. Поэтому уровень грозоупорности ВЛ 6—35 кВ рассчитывается только для двух- или трехфазных импульсных перекрытий, когда возможен его переход в силовую дугу с последующим отключением ВЛ.

При традиционном выполнении ВЛ 10 кВ уровень их грозоупорности не превышает 3—5 кА, и практически каждый прямой удар молнии в линию будет приводить к импульсному перекрытию изоляции на опоре. Использование проводов, покрытых изоляцией, не меняет импульсных характеристик изоляторов, так как в месте крепления этих проводов к изолятору покрытие пробивается специальным металлическим шипом [2] или снимается на расстояние 0,5—1 м в обе стороны от изолятора [3]. Поэтому уровень грозоупорности ВЛП 10 кВ с покрытыми проводами также не превысит 5 кА, и практически каждый удар вызывает перекрытие на опоре или (что почти на два порядка реже) в середине пролета. При расчете вероятности перекрытия именно в середине пролета основным параметром выбирается крутизна тока молнии a (кА/мкс), а возникающее перенапряжение моделируется волной с косоугольным фронтом.

Напряжение между фазами в месте удара молнии рассчитывается по формуле

$$u(t) = a Z_k (1 - K_k) t/2, \quad (1)$$

где Z_k — волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны;
 K_k — коэффициент связи между проводами с учетом импульсной короны;

t — время нарастания фронта волны.

Состояние промежутка провод—провод под воздействием такой волны перенапряжения определяется его вольтсекундной характеристикой. Для системы покрытый провод—воздушный промежуток—покрытый провод данных о вольтсекундной характеристике нет. Поэтому с некоторым приближением вольтсекундная характеристика такой комбинированной изоляции может быть представлена уравнением, которое учитывает импульсную прочность покрытия провода U_1 и импульсную прочность воздушного промежутка провод—провод [4]:

$$U_p = \sqrt{2U_1^2 + (U_0 S)^2 (1 + T/t)}, \quad (2)$$

где U_1 — импульсная прочность слоя покрытия;

S — длина воздушного промежутка;

U_0 , T — постоянные аппроксимации вольтсекундной характеристики воздушного промежутка.

В [2] имеются данные об импульсной прочности покрытия проводов SAX 120 толщиной 2,3 мм. При испытаниях стандартной волной среднее разрядное напряжение для покрытия составило 113 кВ, а для про-

межутка 54 см между двумя покрытыми проводами — 444 кВ. В лаборатории ТВН БГПА были проведены испытания импульсной прочности покрытия отечественных проводов АСИПП 70. Среднее разрядное напряжение составило 100 кВ.

В [5] приведены вольтсекундные характеристики промежутков труба—труба диаметром 1 дюйм. Используя эти данные и считая зависимость $U_0(t)$ в пределах $S = 0,4—1$ м линейной, можно оценить постоянные аппроксимации $U_0 = 504S$ кВ и $T = 4,33$ мкс.

Как показывают результаты расчетов, волновые сопротивления Z и Z_k покрытых проводов мало зависят от наличия покрытия (толщина 2—2,5 мм) и диаметра провода и могут быть приняты $Z = 450$ Ом; $Z_k = 370$ Ом.

Коэффициент связи определяется расстоянием между фазами и практически не зависит от диаметра провода. В соответствии с проведенными расчетами значения K_k для расстояний $S = 0,4; 0,5; 0,6$ и 1 м приняты соответственно: 0,57; 0,54; 0,51; 0,42 независимо от диаметра провода.

Реальные линии имеют ограниченный пролет, по концам которого на опорах изоляция выполнена на штыревых изоляторах. При приходе волны на опору напряжение на изоляторе начинает повышаться

$$u(t) = a Z_k t_1/2, \quad (3)$$

где t_1 — время, которое отсчитывается от момента прихода волны к опоре.

При импульсных воздействиях поведение изолятора описывается вольтсекундной характеристикой, которая аппроксимируется уравнением

$$U_p = U_0 \sqrt{1 + T/t}, \quad (4)$$

где U_0, T — постоянные, зависящие от типа изолятора; для изолятора ШФ-10Г: $U_0 = 95$ кВ; $T = 0,945$ мкс [4], для изолятора ШФ-20Г: $U_0 = 116$ кВ; $T = 2,25$ мкс.

При перекрытии изоляции на опоре от нее к месту удара молнии направляется отраженная волна, и напряжение между проводами ВЛ снижается. Поэтому время нарастания напряжения в месте удара молнии в пролете и значение этого напряжения ограничены моментом прихода в точку удара отраженной волны. Если это напряжение меньше электрической прочности промежутка провод—провод, то импульсного разряда в середине пролета не будет.

Общее время нарастания напряжения в месте удара

$$t = l/V + t_1 + l/V, \quad (5)$$

где l — расстояние от места удара молнии до ближайшей опоры; $V = 300$ м/с — скорость движения волны.

Нетрудно видеть, что t будет максимальным при ударе молнии в середину пролета, когда $l = L/2$, где L — длина пролета ВЛ. Тогда

$$t = L/V + t_1. \quad (6)$$

Если t достаточно для нарастания напряжения в середине пролета до разрядного для промежутка провод—провод, то из уравнения (6) можно получить критическую длину пролета

$$L_{\text{кр}} = (t - t_1)V. \quad (7)$$

Ее можно рассчитать, решая совместно систему уравнений (1)—(4) и (7). Если действительная длина пролета меньше критической, то при заданной крутизне тока молнии разряда в середине пролета не будет, т. е. длина пролета ВЛ должна быть меньше $L_{\text{кр}}$.

В табл. 1 приведены результаты расчета критической длины пролета при различных междуфазных расстояниях S для изоляторов ШФ-10Г и ШФ-20Г в зависимости от крутизны тока молнии a .

Анализ результатов расчетов показывает, что критическая длина пролета при заданной крутизне волны зависит от междуфазного расстояния и типа изоляторов (их импульсного напряжения перекрытия). Так как в настоящее время существующие и строящиеся ВЛ 10 кВ имеют пролеты не более 70 м, то из условий импульсного пробоя в середине пролета можно сократить междуфазное расстояние до 0,5 м. Тогда при $a = 36$ кА/мкс критическая длина пролета для изоляторов ШФ-10Г и ШФ-20Г составляет соответственно 80 и 70 м, что удовлетворяет заданным условиям.

Таблица 1

Расстояние между фазами, м	Длина пролета $L_{\text{кр}}$, м, при крутизне тока молнии a , кА/мкс			
	36	25	18,8	10,8
Изоляторы ШФ-10Г				
0,4	69	88	108	160
0,5	78	100	122	181
0,6	86	110	135	199
1,0	113	145	177	263
Изоляторы ШФ-20Г				
0,4	60	77	94	140
0,5	69	89	109	161
0,6	77	99	121	179
1,0	103	134	164	243

Число прямых ударов молнии в линию при ее длине 100 км, средней высоте подвеса провода 7 м и 40 грозových часах в году $N_{\text{уд}} < 10$. Принимается 10. Вероятность того, что при ударе в линию крутизна тока молнии будет больше критической и произойдет импульсный пробой между проводами в середине пролета, определяется выражением [6]

$$\lg P_a = -a/36.$$

Вероятность перехода импульсного пробоя в дугу сопровождающего тока P_d для ВЛ 10 кВ не превышает 0,1 и принимается 0,1 [4, 6].

Таким образом, для заданной длины пролета число возможных случаев возникновения силовой дуги между проводами в середине пролета в год составляет

$$N_d = N_{уд} P_a P_d.$$

Совместное решение уравнений (1)—(4) и (7) при заданной длине пролета дает возможность подсчитать критическую крутизну тока молнии, которая вызывает пробой в середине пролета. Результаты расчетов основных показателей для разных пролетов и изоляторов ШФ-10Г и ШФ-20Г и междуфазных расстояний 0,4 и 0,5 м приведены в табл. 2.

При расстоянии между фазами 0,5 м и длине пролета 70 м на 100 км ВЛП 10 кВ возможно возникновение дуги сопровождающегося тока в середине пролета не чаще, чем 1 раз в 10 лет. При уменьшении пролета до 60 м вероятность снижается почти в два раза, а при снижении до 50 м можно ожидать перехода импульсного разряда в дугу сопровождающегося тока не чаще, чем 1 раз в 40 лет на 100 км ВЛ.

Таблица 2

Показатели	Тип изолятора	Длина пролета, м					
		50	60	70	50	60	70
		Расстояние между проводами					
		S = 0,4 м			S = 0,5 м		
Критическая крутизна тока молнии $a_{кр}$, кА/мкс	ШФ-10Г	57	44	35	69	53	42
	ШФ-20Г	47	36	29	58	44	36
Вероятность удара молнии с критической крутизной P_a	ШФ-10Г	0,026	0,06	0,11	0,012	0,034	0,07
	ШФ-20Г	0,05	0,1	0,16	0,025	0,06	0,1
Число ударов молнии в ВЛ на 100 км за 1 год при 40 грозовых часах $N_{уд}$		10			10		
		10			10		
Число импульсных перекрытий в середине пролета ВЛ на 100 км за 1 год N_N	ШФ-10Г	0,26	0,6	1,1	0,12	0,34	0,7
	ШФ-20Г	0,5	1,0	1,6	0,25	0,6	1,0
Число появлений дуги сопровождающегося тока в середине пролета N_d	ШФ-10Г	0,026	0,06	0,11	0,012	0,034	0,07
	ШФ-20Г	0,05	0,1	0,16	0,025	0,06	0,1

Надо отметить, что в расчете рассматривался самый неблагоприятный случай, когда удар молнии приходится точно в середину пролета. При ударе молнии ближе к одной из опор время пробега волны сокращается и вероятность импульсного пробоя в середине пролета снижается. Это равноценно уменьшению длины пролета.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования доказывают возможность уменьшения междуфазных расстояний при горизонтальном расположении проводов до 50 см и при расположении проводов в вершинах треугольника — до 65—70 см. При таких расстояниях импульсная прочность ВЛП и электрическая прочность на промышленной частоте определяются разрядными напряжениями изоляторов, т. е. дальнейшее увеличение междуфазных расстояний не приводит к повышению надежности ВЛ.

2. Результаты расчетов вероятности появления дуги сопровождающего тока в середине пролета показывают, что при междуфазном расстоянии 50 см и длине пролета 70 м число таких случаев на 100 км линии составляет 0,07—0,1 в год. Если учесть, что удар молнии равновероятен в любую точку пролета, то эта вероятность снижается до величин, практически исключающих такую возможность.

3. При выполнении переходов через препятствия или необходимости увеличить пролет больше критического (100 м и более) целесообразно использовать опоры с увеличенным междуфазным расстоянием или применять на них обычные опоры и голый провод.

4. Поскольку грозоупорность ВЛП равна грозоупорности ВЛ 10 кВ в традиционном исполнении и основные расчетные параметры ВЛП и ВЛ 10 кВ практически одинаковы, вся система грозозащиты специальных случаев (переходы в кабель, пересечения с ВЛ других классов и т. д.) должна выполняться в соответствии с действующими правилами РУ и ПУЭ для ВЛ 10 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение изолированных проводов на воздушных линиях электропередач напряжением 10 кВ / К. Ф. Степанчук, Г. С. Климович и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1999. — № 3. — С. 21—25.

2. ПАС-система ЭНСТО: Каталог СЕККО А. О. — Хельсинки, 1993. — С. 4.

3. Lee R., Fritz D., Stiller P. Prevention of cover conductor burndown on distribution circuits-arcing protection devices // IEEE Trans. On Power App. And System. — 1982. — Vol. PAS/01. — № 8. — P. 2434.

4. Перенапряжения в сетях 6—35 кВ / Ф. А. Гиндуллин, В. Г. Гольдштейн и др. — М.: Энергоатомиздат, 1989.

5. Los E. J. New studies of the transient glow discharge in parallel electrode gaps // IEEE Trans. On Power App. And System. — 1980. — Vol. PAS-99. — № 2. — P. 720.

6. Техника высоких напряжений / Под ред. М. В. Костенко. — М.: Высш. шк., 1973.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 2.04.1999

УДК 621.316

УЧЕТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А.,
канд. техн. наук МАХМУД МОХАМАД**

Белорусская государственная политехническая академия

Драматические события на Балканах в 1999 г. убедительно показали наличие вероятности возникновения кризисных ситуаций. Это в первую очередь касается строительства устойчивых к взрывной волне трансфор-