Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com

Зубков А.С.

ПОВЫШЕНИЕ ГРОЗОУПОРНОСТИ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ ПУТЕМ УСТАНОВКИ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ ТИПА ОПН

Постановка исследований. Преимущества двухцепных ВЛ как средних, так и высших классов напряжения, по сравнению с одноцепными ВЛ соответствующих классов напряжения в основном определяются:

- организацией резервированного питания особо ответственных потребителей (при выходе из строя одной цепи питание объекта осуществляется по оставшейся в эксплуатации второй цепи),
- уменьшением полосы отчуждения при строительстве ВЛ определенной мощности по сравнению со строительством одноцепных ВЛ.

Вместе с тем при проектировании любого объекта электросетевого строительства должен учитываться не только нормальный режим его эксплуатации, но и разного рода аномальные ситуации, неминуемо возникающие в практике. При этом необходимо обеспечивать во-первых локализацию технологического нарушения, во вторых предусматривать рациональные меры восстановления режима нормальной эксплуатации ВЛ. К аномальным ситуациям, в частности, относятся те события, которые приводят к возникновению опасных перенапряжений: внутренних (частным случаем которых являются коммутационные перенапряжения) и грозовых, обусловленных ударами молнии в такие протяженные объекты, какими являются воздушные ЛЭП. Исследованию перенапряжений в ЛЭП посвящено достаточно большое количество публикаций, в том числе отдельные разделы в учебниках и учебных пособиях по ТВН [1]-[4] и монографии [5]. Однако в этих работах мало внимания уделено особенностям протекания электромагнитных процессов в двухцепных электропередачах. Вместе с тем цепи, расположенные на одной опоре, находятся в едином электростатическом и электромагнитном полях, что и обуславливает зачастую существенные особенности в характере протекания электромагнитных переходных процессов по сравнению с соответствующими процессами в одноцепных ВЛ.

В большинстве случаев линии на металлических опорах оснащены одним или двумя заземленными тросами, подвешиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя основную часть ударов молнии. Как показано в [6] применение тросовой защиты, позволяет снизить величину индуцированных перенапряжений примерно на 30 %. Однако наличие тросов не исключает появление высоких потенциалов на фазных проводах за счет обратных перекрытий с тела опоры на фазные провода, а также, хотя и с малой вероятностью, удара молнии в фазный провод. Поражение молнией фазного провода на одноцепных опорах, как правило, приводит за счет перекрытия изолирующей подвески к однофазному замыканию на ВЛ. На двухцепных же опорах обратное перекрытие приводит к замыканию между двумя цепями. Очевидно, что такое развитие событий должно быть исключено.

В последнее время для повышения надежности эксплуатации линейной изоляции линий электропередач широкое применение находят защитные аппараты типа ОПН, установленные непосредственно на опорах ВЛ [7,8]. Изложенное позволяет заключить, что одной из возможных ниш использования подвесных ОПН является их установка именно на двухцепных опорах.

Оценка перенапряжений на изоляции двухцепных ВЛ 110-330 кВ производилась как при ударе молнии в опору или в трос, в непосредственной близости от опоры, так и при прорыве молнии сквозь тросовую защиту и поражении фазного провода. Рассматривался также прямые удары молнии в провода двухцепных ВЛ при отсутствии тросов.

Уровни перенапряжений на ВЛ, не оснащенных ОПН. Для расчета уровней перенапряжений на изоляции ВЛ при попадании молнии в опору или в трос вблизи от опоры при не учете ориентировки канала лидера молнии амплитуда $I_м$ и крутизна $I'_м$

волны тока молнии принималась подчиненными логарифмически нормальному закону распределения [9]:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_{lnx}} e^{-\frac{(ln(x) - m_{lnx})^2}{2\sigma_{lnx}^2}},$$

где $m_{\ln I_M} = 3{,}4078$, $s_{\ln I_M} = 0{,}6217$, $m_{\ln I'_M} = 2{,}5328$, $s_{\ln I'_M} = 0{,}5987$,

При принятых параметрах законов распределения $F_X(x_{max}) = 0{,}95$ отвечают $I_{м.\max} = 84$ кА, $I'_{м.\max} = 34$ кА/мкс. Уровни же напряжений на линейной изоляции при сопротивлении заземления опор, равном 10 Ом для ВЛ 110 кВ, 150 кВ, 200 кВ и 330 кВ при этих параметрах волны тока молнии составляют 1100 кВ, 1280 кВ, 1600 кВ и 2140 кВ, соответственно.

При таких и больших значениях напряжения на ВЛ 110-150 кВ, изоляция которых выполнена на изоляторах ПС6-Б и ПС210-В, при ударе молнии в трос вблизи опор или в опоры будут иметь место обратные перекрытия с тела опоры на провода (вольт-секундные характеристики линейной изоляции были любезно предоставлены СибНИИЭ). Расчеты показывают, что в случае больших значений сопротивлений заземления опор (при $R_{З.И}$ > 20 Ом) на ВЛ 220 кВ, 330 кВ прямые удары молнии в опору или в трос вблизи опоры, также приведут к возникновению обратных перекрытий. Следовательно, при оценки надежности эксплуатации двухцепных ВЛ удар молнии в опору или в трос вблизи опоры является расчетным для ВЛ всех рассматриваемых классов напряжения.

Для оценки перенапряжений на изоляции ВЛ возникающих при прорыве молнии сквозь тросовую защиту и поражении фазного провода двухцепных ВЛ была использована математическая модель ориентировки канала лидера молнии, предложенная в СибНИИЭ [10, 11], в которой распространение лидера молнии и развитие встречных разрядов рассматриваются как случайные процессы.

На основе этой методики были получены законы распределения амплитуд токов молний, прорвавшихся на провода ВЛ 110-330 кВ сквозь тросовую защиту. Анализ результатов расчетов показал, что при учете ориентировки канала лидера молнии амплитуды токов молний на проводах снижаются по сравнению с амплитудами, полученными при не учете этой ориентировки. Влияние учета ориентировки канала лидера молнии на закон распределения вероятностей амплитуд волн тока молнии для ВЛ на двухцепных опорах типа ПБ 110-2 ($h_{пр}$ = 18,5 м; $h_{тр}$ = 22 м) проиллюстрировано на рис.1.

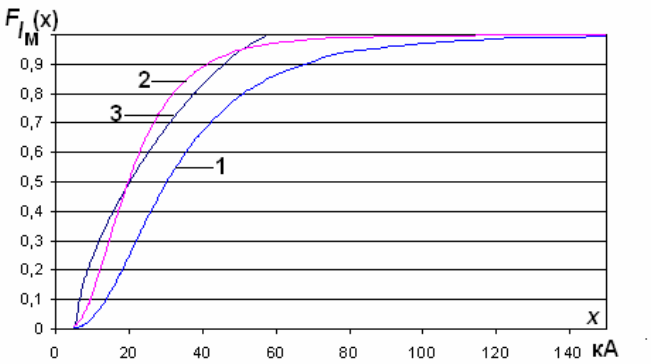


Рис.1. Функции распределения вероятностей амплитуд токов молнии, поразивших фазные провода двухцепной ВЛ; 1– при не учете ориентировки канала лидера молнии, 2 и 3 – при учете этой ориентировки

На рис.1 кривая 1 приведена при аппроксимации закона распределения гипотетическим логарифмически нормальным законом, кривые 2 и 3 отвечают аппроксимациям в виде бета-распределения (кривая 2) и логарифмически нормального распределения (кривая 3). Кривая 1 в случае тросовой защиты ВЛ отвечает закону распределения амплитуд волн токов молнии при её попадании в трос.

Из рисунка видно, что амплитуды токов молний, поражающих фазные провода, при учете ориентировки канала лидера молнии меньше амплитуд токов молнии, поражающих трос. Так, при $F_X(x_{max})$ = 0,95 амплитуды токов молнии составляют при попадании молнии в провод и трос $I_{м.\max}$ = 50 кА и 84 кА, соответственно.

Следует отметить что:

- увеличение высоты подвеса проводов приводит к увеличению вероятности поражения их молнией и к возрастанию амплитуд прорвавшихся молний. Так при увеличении подвеса проводов ВЛ 110 кВ примерно на 6 метров вероятность прорыва увеличилась с 0,009 до 0,02, а расчетная амплитуда волны тока молнии - с 50 до 57 кА;
- вероятность поражения молнией фазных проводов двухцепных ВЛ с вертикальным расположением фаз превышает от 4-х до 10 раз вероятность поражения фаз одноцепной ВЛ. Уровень амплитуд прорвавшихся волн токов молний на провода двухцепных ВЛ в 1,6 раза выше, чем на провода одноцепных ВЛ того же класса напряжения и тех же габаритов;
- при вертикальном расположении проводов на опорах двухцепных ВЛ с одним тросом чаще поражаются верхние фазы.

Таким образом, проведенное исследование позволяет заключить, что изоляция фаз двухцепных ВЛ при их грозовых поражениях находится в более тяжелых условиях, чем изоляция фаз одноцепных ВЛ и, поэтому, требует повышенного внимания в грозовые сезоны. Напряжения на изоляции ВЛ, при ударах молнии в фазные провода, приведены в табл.1.

Таблица 1

Максимумы волн напряжений на изоляции ВЛ при ударах молний в провода с учетом ориентировки канала лидера молнии ($I_М$ при P=0.95)

$U_{.ВЛ}$, кВ	35	110	150	220	330
$Z_{пр}$, Ом	485	450	455	430	320
$U_{изол\ max}$, кВ	12125	11250	10692	11395	8160

Несмотря на то, что уровень напряжения на изоляции ВЛ при учете ориентировки канала лидера молнии снизился, однако, из таблицы следует, что линейная изоляция линий всех рассмотренных классов напряжения при принятой амплитуде волны тока молнии будет перекрываться.

Из сопоставления напряжений на изоляции, возникающих при поражении молнией грозозащитного троса и провода следует, что при прорыве молнии сквозь тросовую защиту напряжение на изоляции ВЛ примерно в 8 раз превышает напряжение на изоляции при ударе молнии в опору или в трос вблизи опоры. Однако большую часть ударов молний принимает на себя тросовая защита. Таким образом, расчетными случаями для ВЛ 110-330 кВ при оценке токовых и энергетических характеристик линейных ограничителей перенапряжений являются как удары молний в опору или в трос вблизи от опоры, так и прямые удары молний в фазные провода.

В табл.2 приведены относительные количества ударов молнии в ВЛ при трех расчетных случаях её грозовых поражений:

- при ударе в опору или в трос в близи опоры ($N_{оп}/N$);
- при ударе в трос в средней части пролета ($N_{тр}/N$);
- при ударе в провод (прорыв молнии через тросовую защиту) ($N_{пр}/N$).

(N – общее число ударов молнии).

Таблица 2

Относительное количество ударов молнии в ВЛ при трех расчетных случаях грозовых поражений

Виды грозовых поражений	Тип опор							
	ПБ 110-2	П 110-2В	П 150-2	П 150-2В	П 220-2	П 220-2т	П 330-2	П 330-2т
$N_{оп}/N$	0,59	0,83	0,57	0,82	0,78	0,78	0,58	0,58
$N_{тр}/N$	0,39	0,12	0,38	0,11	0,18	0,18	0,39	0,40
$N_{пр}/N$	0,02	0,05	0,05	0,07	0,04	0,04	0,03	0,02

Из таблицы следует, что наибольшее количество ударов молнии приходится на опору и на трос. При этом благодаря ориентировке канала лидера слаботочных молний и инициированию встречных разрядов с проводов и тросов основные удары при прорывах молнии сквозь тросовую защиту приходятся на верхние фазы, нижние же фазы двухцепных ВЛ практически не подвергаются ударам молнии, так как экранированы фазами, расположенными выше (табл.3).

Таблица 3

Процентное распределение количества ударов молнии по фазам двухцепных ВЛ

Номер провода	Тип опор							
	ПБ 110-2	П 110-2В	П 150-2	П 150-2В	П 220-2	П 220-2т	П 330-2	П 330-2т
1	44	44	47	44	44	38	48	41
2	5	6	3	5	5	12	2	9
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	45	44	47	45	45	39	48	41
5	6	6	3	6	6	11	2	9
6	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание: 1 и 3 – верхние провода, 2 и 4 – средние по высоте подвеса провода, 3 и 6 – нижние провода.

Как видно из таблицы применение второго грозозащитного троса (на ВЛ с опорами типа П 220-2т, П 330-2т) приводит к лучшей защищенности верхних фаз и увеличению числа поражений молнией средних фаз.

Защита двухцепных ВЛ от грозовых перенапряжений с помощью ОПН, устанавливаемых на опорах. Анализ целесообразности установки подвесных ОПН на всех фазах защищаемого участка двухцепных ВЛ следует производить с учетом грозовой интенсивности в регионе трассы ВЛ, уровня сопротивления заземления опор, ущербов от перекрытий изоляции, требуемого уровня надежности и т.д.

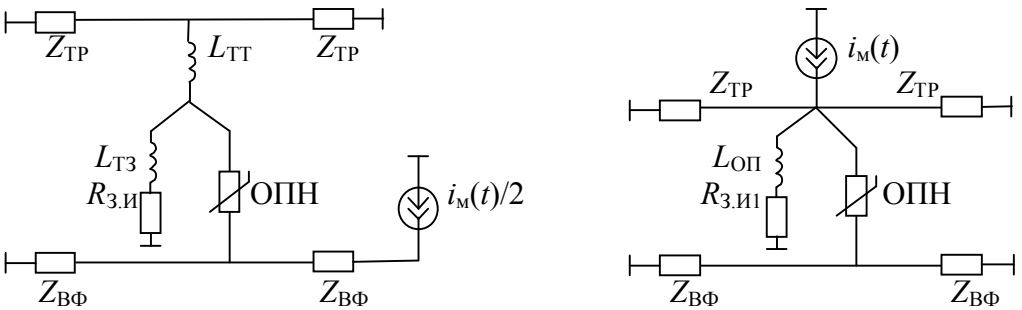
Анализ влияния величины сопротивления заземления опор на грозоупорность ВЛ при установке ОПН на опорах позволяет сделать следующие выводы:

- при сопротивлениях заземления, не превышающих 10 Ом, удары молнии в опору или в трос не приводят к возникновению обратных перекрытий, прорвавшиеся же сквозь тросовую защиту молнии приведут к неминуемому перекрытию линейной изоляции. Поэтому, исходя из того, что основные удары молний при прорывах тросовой защиты приходятся на верхние фазы, при таких величинах сопротивления заземления целесообразна установка ОПН лишь на верхних фазах;
- при сопротивлениях заземления опор, больших 10-20 Ом, удары молнии в трос или в опору приведут к возникновению обратных перекрытий с тела опоры на провода нижних фаз. Установка дополнительных ОПН на нижних фазах в этих расчетных случаях позволит уменьшить вероятность возникновения обратных перекрытий.

Так, для двухцепных ВЛ 110-330 кВ, при сопротивлениях заземления опор равных 30 Ом и более 40 Ом, количество устанавливаемых ОПН на опоре, необходимо довести до 4-х и 6-ти, соответственно. Следует, однако, отметить, что при значениях сопротивлений заземления 30÷40 Ом для защиты от ударов молний в опору или в трос вблизи опоры одной двухцепной ВЛ потребуется меньшее количество аппаратов, чем при защите двух одноцепных ВЛ.

На величину требуемой энергоемкости защитных аппаратов типа ОПН влияет величина сопротивления заземления опор. Результаты расчетов показали, что для оценки максимальных токовых нагрузок подвесных аппаратов можно моделировать лишь один пролет ВЛ, так как токовые нагрузки аппаратов соседних узлов существенно меньше, чем в узлах, непосредственно примыкающих к пораженному молнией пролету.

Упрощенные расчетные схемы для исследования токовых и энергетических нагрузок подвесных линейных ОПН при ударе молнии в фазный провод в пролете ВЛ и в опору или в трос вблизи опоры приведены на рис.2(а и б). В схемах учтены импульсное сопротивление заземления опоры ($R_{З.И}$), индуктивность части тела опоры (от траверсы до места подвеса троса) – $L_{ТТ}$, индуктивность части тела опоры (от траверсы до земли) – $L_{ТЗ}$, индуктивность опоры ($L_{ОП}$), волновые фазные сопротивления проводов ($Z_{ВФ}$) и тросов с учетом короны ($Z_{ТР}$).



а) б)

Рис.2. Расчетные схемы для определения токовых нагрузок в подвесных ОПН, установленных на опорах ВЛ;
а) при ударе молнии в фазный провод; б) при ударе молнии в опору или в трос вблизи опоры

Источник молнии моделировался в виде источника тока с нулевой производной тока в начальный момент времени, при моделировании ОПН были учтены динамические свойства его ВАХ [12].

В табл. 4 и 5 приведены токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН, установленных на верхних (табл.4) и нижних (табл.5) фазах, при ударе молнии в фазный провод и в опору или в трос вблизи от опоры.

Таблица 4

Токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН, установленных на верхних фазах двухцепных опор ВЛ 110÷330 кВ, при различном сопротивлении заземления опор

ВЛ, кВ	$R_{З.И}$, Ом	Удар молнии в провод (при наличии троса)		Удар молнии в опору или в трос вблизи от опоры	
		$I_{опн.MAX}$, кА	$W_{опн}$, кДж	$I_{опн.MAX}$, кА	$W_{опн}$, кДж
110	10	29,3	372	6,89	15,2
	30	28,5	212	9,56	33,5
	50	28,8	332	8,92	37,8
	100	28,6	351	10,2	56,7
	10	44,0	753	5,76	31,2
	30	42,8	713	7,38	39,4

220	50	42,2	709	7,17	48,6
	100	40,9	727	8,84	71,9
330	10	38,4	1155	5,17	25,0
	30	37,0	1090	5,59	33,2
	50	36,3	1047	6,10	49,2
	100	35,5	984	7,66	85,3

Из таблицы видно, что при ударах молнии в провод наибольшие энергетические нагрузки испытывают ОПН, установленные на верхних фазах. При этом максимальная поглощаемая энергия будет при наименьшем, из рассмотренных сопротивлений заземления (10 Ом), при увеличении сопротивления заземления ток, протекающий через ОПН, уменьшается и, следовательно, уменьшаются энергетические воздействия, оказываемые на аппараты. При сопротивлениях заземления больших 100 Ом удары молнии в трос или в опору будут сопровождаться большими токами и энергиями. Так при сопротивлении заземления 1000 Ом удар молнии в опору ВЛ 330 кВ приведет к тому, что через ОПН потечет ток с амплитудой 24,9 кА, а энергия, поглощенная аппаратом, будет 632 кДж, в то время как при ударе молнии в провод амплитуда тока составит 27,1 кА, а энергия 721 кДж.

Таблица 5

Токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН, установленных на нижних фазах двухцепных опор ВЛ 110÷330 кВ, при различных сопротивлениях заземления опор

ВЛ, кВ	$R_{З.И}$, Ом	Удар молнии в провод (при наличии троса)		Удар молнии в опору или в трос вблизи от опоры	
		$I_{опн.MAX}$, кА	$W_{опн}$, кДж	$I_{опн.MAX}$, кА	$W_{опн}$, кДж
110	30	2,90	5,50	12,4	44,8
	100	4,60	17,2	13,7	74,0
220	30	2,59	5,80	9,75	54,0
	100	5,19	25,0	13,4	117
330	30	2,98	7,90	8,97	58,7
	100	5,97	31,0	14,9	156

Как видно из табл. 4 и 5 при ударах молнии в опору или в трос вблизи опоры аппараты, установленные на нижних фазах, испытывают большие энергетические воздействия, чем при ударах молнии в провод. Следовательно, определяющим грозовым воздействием при выборе аппаратов, устанавливаемых на нижних фазах, будут являться удары молнии в опору или в трос вблизи опоры.

Таким образом, в зависимости от величины сопротивления заземления, грозовой активности, уровня изоляции ВЛ, требуемого уровня надежности ВЛ и т.д можно предложить различные решения по установке ОПН на опорах. Основные же принципы такой установки можно сформулировать следующим образом:

- Для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в опору или в трос вблизи опоры, устанавливается необходимое количество ОПН с малой пропускной способностью;
- Для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в фазные провода на верхних фазах устанавливаются ОПН с большой пропускной способностью;
- Для экономически целесообразной надежной защиты ВЛ от перенапряжений, вызванных любыми проявлениями грозовой деятельности, на опорах целесообразно устанавливать ОПН, как с большой, так и с малой пропускной способностью;
- Проектирование грозозащиты двухцепных ВЛ с помощью подвесных ОПН необходимо производить при конкретной привязке к объекту.

Список использованной литературы

1. **Техника высоких напряжений**: **Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических вузов**. Под общей ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. И доп. М., «Энергия», 1976.
2. **Техника высоких напряжений**: **Учебник для вузов.**-Под ред. Г.С. Кучинского.- СПб.:Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003.-608 с.: ил.
3. **Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник**. / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А. А. Рейхердт А.А.. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.– (Серия «Учебники НГТУ»).
4. **Перенапряжения в электрических системах и защита от них: Учебник для вузов** / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю. А. Михайлов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1995. - 320 с.: ил.
5. **Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А.** Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.
6. ***Rachidi F., Nucci C.A., Ianoz M., Mazzetti C.*** Response of multiconductor power lines to nearby lightning return stroke electromagnetic fields //IEEE Trans. On Power Delivery.- Vol. 12.- No. 3.- 1997. P.1404.
7. ***Kawamura T., Nagano M., Ichihara M., Ishikawa K., Mizoguchi S., Imakoma T., Shimomura T.*** Development of metal - oxide transmission line arrester and it's effectiveness. //CIGRE,- 1994 Session. - Rep.33.201.
8. ***Washino***, et al. Development of current limiting arcing horn for prevention of lightning faults on distribution lines //IEEE Trans. On Power Delivery.- Vol. 3.- No. 1.- 1988.- P.138.
9. ***Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.*** Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоиздат. - 1978. - 233с.
10. ***Gaivoronsky A.S., Karasyuk K.V.*** Numerical model of lightning leader orientation on transmission line //Pros. 8-th Internat. Symposium on High Voltage Engineering. - Japan. Yokohama.- 1993.- P.277.
11. ***Карасюк К.В.*** Численные исследования и разработка методов расчета грозоупорности ВЛ УВН. - Диссертация на соиск. уч. ст. канд. техн. наук.- Новосибирск. - НГТУ. - 1996.-170 с.
12. ***Кадомская К.П., Рейхердт А.А.*** Влияние способа моделирования ОПН и волны тока молнии на энергетические характеристики защитных аппаратов, установленных на опорах ВЛ. Научный вестник НГТУ, Новосибирск, 2002-№1(12).