

УДК 621.316

**Определение токов электродинамической стойкости гибких шин
распределительных устройств высокого напряжения
по условию максимально допустимого сближения фаз**

Баран А.Г., Васильева А.А., Туманов П.С.

Научный руководитель – д.т.н., профессор СЕРГЕЙ И.И.

Согласно ГОСТ оценка электродинамической стойкости гибких проводов должна производиться по двум условиям [1]:

$$s_{\max} \leq s_{\text{доп}},$$

$$T_{\max} \leq T_{\text{доп}},$$

где s_{\max} , T_{\max} , $s_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ – соответственно максимальные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

Оба параметра непрерывно связаны с током КЗ. Поэтому, изменяя ток КЗ, можно добиться совпадения максимальных и допустимых значений и тем самым установить максимально допустимое значение тока КЗ. Эти значения по двум условиям могут не совпадать, поэтому из двух полученных значений выбирается наименьшее, которое и будет являться током электродинамической стойкости.

Вычислительный эксперимент проводился по КП BusEf. Исследования проводились для пролетов различной длины: 20–30 м соответствуют напряжению 110 кВ, 35–40 м – 220 кВ и 45–60 м – 330 кВ. Междофазное расстояние согласно [2] при напряжении 110 кВ равно 3 м, при 220 кВ – 4 м и при 330 кВ – 6 м. Расчеты велись для проводов наиболее часто встречаются в распределительных устройствах: АС-185/29, АС-500/27 и АС-800/105. Параметры рассматриваемых проводов представлены в таблице 1. При проведении исследований учтены гирлянды изоляторов (таблица 2). Влияние гибкости порталов в расчетах не учитывалось.

Таблица 1 – Параметры проводов

Марка провода	Вес одного метра провода, даН/м	Площадь поперечного сечения, мм ²	Диаметр провода, мм	Модуль упругости материала провода, даН/мм ²
АС-185/29	0,729	210,0	18,8	8193,0
АС-500/27	1,538	507,6	27,4	7018,0
АС-800/105	3,093	926,0	39,7	7853,0

Таблица 2 – Данные о гирляндах изоляторов в зависимости от номинального напряжения

Марка изолятора	Длина гирлянды изоляторов, м	Вес гирлянды изоляторов, даН	Число изоляторов в цепи, шт	Число цепей, шт
ПС 6А – 110 кВ	1,5	41	9	1
ПС 6А – 220 кВ	2,4	69	16	1
ПС 6А – 330 кВ	3,3	204	22	2

За расчетное принято двухфазное КЗ, т. к. при нем наступает максимальное сближение соседних фаз. За максимально допустимый ток электродинамической стойкости гибких шин принималось значение тока КЗ, соответствующее минимально допустимому расстоянию между проводниками соседних фаз при их сближении после отключения КЗ (таблица 3).

Таблица 3 – Минимально допустимые расстояния между проводами [2]

Напряжение, кВ	6–10	110	220	330
Минимально допустимое расстояние a_{\min} , м	0,15	0,45	0,95	1,40

Таблица 4 – Токи электродинамической стойкости, определенные по условию недопустимого сближения проводов для провода АС-185/29

Время КЗ, с	Длина пролета, м	$U_{ном} / a_{мин}$, кВ / м	1-ая траектория		2-ая траектория	
			$I_{КЗ}^{(2)}$, кА	$a_{откл}$, м	$I_{КЗ}^{(2)}$, кА	$a_{откл}$, м
0,1	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	33,38	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	27,15	0,45
	35	220 / 0,95	27,21	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	25,4	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	43,0	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	45,81	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	49,36	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	37,02	1,4	–	–
0,2	20	110 / 0,45	20,9	0,45	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	29,15	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	23,5	0,45
	35	220 / 0,95	22,65	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	20,93	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	35,78	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	38,78	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	42,12	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	32,23	1,4	–	–
0,3	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	26,85	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	21,8	0,45
	35	220 / 0,95	20,05	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	18,35	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	31,52	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	34,78	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	37,95	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	27,25	1,4	–	–
0,4	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	17,00	0,45	–	–
	30	110 / 0,45	12,6	0,45	–	–
	35	220 / 0,95	18,4	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	16,65	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	29,75	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	32,68	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	35,58	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	25,61	1,4	–	–
0,5	20	110 / 0,45	17,55	0,45	–	–
	25	110 / 0,45	15,8	0,45	–	–
	30	110 / 0,45	11,2	0,45	–	–
	35	220 / 0,95	17,3	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	15,45	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	28,05	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	31,69	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	35,17	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	25,19	1,4	–	–

Таблица 5 – Токи электродинамической стойкости, определенные по условию недопустимого сближения проводов для провода АС-500/27

Время КЗ, с	Длина пролета, м	$U_{\text{ном}} / a_{\text{мин}}$, кВ / м	1-ая траектория		2-ая траектория	
			$I_{\text{КЗ}}^{(2)}$, кА	$a_{\text{откл}}$, м	$I_{\text{КЗ}}^{(2)}$, кА	$a_{\text{откл}}$, м
0,1	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	36,62	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	33,52	0,45
	35	220 / 0,95	–	–	46,67	0,95
	40	220 / 0,95	30,6	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	54,4	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	54,7	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	51,35	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	39,45	1,4	–	–
0,2	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	31,05	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	27,87	0,45
	35	220 / 0,95	27,47	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	24,97	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	45,19	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	44,19	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	43,38	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	33,15	1,4	–	–
0,3	20	110 / 0,45	–	–	39,65	0,45
	25	110 / 0,45	–	–	29,05	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	25,65	0,45
	35	220 / 0,95	23,45	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	22,1	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	40,75	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	39,95	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	38,34	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	28,98	1,4	–	–
0,4	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	28,05	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	24,42	0,45
	35	220 / 0,95	21,22	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	20,0	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	37,48	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	36,5	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	34,5	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	27,2	1,4	–	–
0,5	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	–	–
	30	110 / 0,45	–	–	24,5	0,45
	35	220 / 0,95	19,8	0,95	–	–
	40	220 / 0,95	18,55	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	35,74	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	33,98	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	32,1	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	24,78	1,4	–	–

Таблица 6 – Токи электродинамической стойкости, определенные по условию недопустимого сближения проводов для провода АС-800/105

Время КЗ, с	Длина пролета, м	$U_{ном} / a_{мин}$, кВ / м	1-ая траектория		2-ая траектория	
			$I_{КЗ}^{(2)}$, кА	$a_{откл}$, м	$I_{КЗ}^{(2)}$, кА	$a_{откл}$, м
0,1	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	47,58	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	–	–
	35	220 / 0,95	–	–	58,1	0,95
	40	220 / 0,95	42,53	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	–	–	94,8	1,4
	50	330 / 1,4	–	–	89,3	1,4
	55	330 / 1,4	–	–	84,85	1,4
	60	330 / 1,4	–	–	80,25	1,4
0,2	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	40,05	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	38,97	0,45
	35	220 / 0,95	–	–	48,28	0,95
	40	220 / 0,95	34,68	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	–	–	77,85	1,4
	50	330 / 1,4	–	–	73,65	1,4
	55	330 / 1,4	–	–	70,32	1,4
	60	330 / 1,4	–	–	65,7	1,4
0,3	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	37,55	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	36,25	0,45
	35	220 / 0,95	–	–	44,45	0,95
	40	220 / 0,95	30,76	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	–	–	73,1	1,4
	50	330 / 1,4	–	–	67,6	1,4
	55	330 / 1,4	–	–	63,9	1,4
	60	330 / 1,4	–	–	59,25	1,4
0,4	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	37,4	0,45
	30	110 / 0,45	–	–	35,18	0,45
	35	220 / 0,95	–	–	42,3	0,95
	40	220 / 0,95	28,2	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	45,16	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	–	–	64,95	1,4
	55	330 / 1,4	–	–	60,64	1,4
	60	330 / 1,4	–	–	55,15	1,4
0,5	20	110 / 0,45	–	–	–	–
	25	110 / 0,45	–	–	–	–
	30	110 / 0,45	24,9	0,45	–	–
	35	220 / 0,95	–	–	41,85	0,95
	40	220 / 0,95	26,6	0,95	–	–
	45	330 / 1,4	41,6	1,4	–	–
	50	330 / 1,4	39,7	1,4	–	–
	55	330 / 1,4	38,0	1,4	–	–
	60	330 / 1,4	–	–	52,8	1,4

Анализ траекторий движения проводов после отключения КЗ показывает, что в зависимости от длины пролета и стрелы провеса провода могут быть две траектории движения, при которых возможно недопустимое сближение фаз. Первая характерна для средних значений токов КЗ, когда провод после того как поднялся на определенную высоту, начинает свое падение под некоторым углом к своему первоначальному положению. Вторая обусловлена действием больших токов КЗ, когда импульса ЭДУ достаточно для того, чтобы заставить провод двигаться по круговой траектории.

Результаты расчета тока электродинамической стойкости для гибких шин ОРУ, исходя из рассмотрения минимально возможных расстояний между проводами при их сближении после отключения КЗ, представлены в таблицах 4–6.

Из таблиц 4–6 видно, что для пролетов небольшой длины (20, 25 м), где междуфазное расстояние более чем в два раза превышает стрелу провеса провода, опасное сближение фаз не наступает. Поэтому в этом случае ток электродинамической стойкости будет однозначно определяться из рассмотрения максимально допустимого тяжения провода при КЗ.

Литература

1. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.01.94. – М. : Госстандарт России, 1993. – 57 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.