

## СЕКЦИЯ 2. Электрические станции

УДК 621.315/316.351

### ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ГИБКИЕ ПРОВОДА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЭНЕРГОСИСТЕМ

*Трусов В.В., Козел Ю.В., Чирец А.В., Андрукевич А.П.*

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор СЕРГЕЙ И.И.

Проблема электродинамических воздействий токов короткого замыкания на гибкие провода электроустановок энергосистем стала особенно актуальной к концу 70-х годов, когда непрерывно наращивались мощности электростанций, проектировались распределительные устройства с сокращенными габаритами, велись исследования компактных воздушных линий электропередачи повышенной пропускной способности со сближенными фазами. Это инициировало разработку методов математического моделирования и вычислительного эксперимента для исследования динамики их токоведущих конструкций с гибкими проводами при коротком замыкании.

В электроустановках высокого напряжения энергосистем широко применяются токоведущие конструкции с гибкими проводами. Особенностью их динамики является недопустимое сближение и даже схлестывание соседних фаз в результате электродинамического действия токов КЗ, сопровождающегося ударными нагрузками на конструктивные элементы РУ и воздушных линий электропередач. Электродинамические воздействия больших токов КЗ – ключевые факторы, влияющие на выбор геометрических размеров и механической прочности токоведущих конструкций с гибкими проводами. Согласно ПУЭ «большими» для гибких проводов являются токи КЗ, имеющие величину более 20 кА. Их существующие уровни превысили указанное значение не только в сетях высокого, но и сверхвысокого напряжения.

Динамика проводов при КЗ представляет собой движение упругой механической системы с бесконечно большим числом степеней свободы под воздействием распределенных электродинамических усилий (ЭДУ), пульсирующих с частотами 50 и 100 Гц. Математическое описание этого движения производится в общем случае нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых представляет значительные трудности. Провода вместе с гирляндами изоляторов, опорами и другими конструктивными элементами электроустановок образуют при КЗ единую колебательную систему, что значительно усложняет решение задачи.

В БНТУ разработаны программный комплекс BUSEF и его модификация для расщепленных проводов FAZA, которые по своим возможностям не уступают указанным зарубежным аналогам.

Динамика гибкого провода при КЗ представляет собой движение упругой механической системы под действием распределенных ЭДУ. Провод под действием больших ЭДУ может принимать любую форму, поэтому как механическая система с распределенной массой он характеризуется бесконечно большим числом степеней свободы. Для упрощения задачи вводятся допущения и рассматривается в известной мере «идеализированный» провод, которому придаются некоторые свойства и качества, отсутствующие в действительности. Наибольшее применение получила расчетная модель провода в виде гибкой нити.

Используем расчетную модель провода в виде абсолютно гибкой, растяжимой по закону Гука нити, которая в дальнейшем для простоты будет называться просто гибкой нитью.

В основу указанного метода положены формулы для расчета импульсов ЭДУ при различных видах КЗ. Впервые полученные, они были использованы при разработке упрощенного метода расчета сближения проводов фаз гибкой ошиновки РУ, достоверность результатов которых подтверждена опытом и расчетом.

$$\begin{aligned} S^{(2)} &= 0,2 \frac{L}{a} k_L [I_{\Pi 0}^{(2)}]^2 (t_k + T_a k_a); \\ S_{A,C}^{(3)} &= 0,5 \frac{L}{a} k_L [I_{\Pi 0}^{(3)}]^2 (3t_k + 3,232 T_a k_a); \\ S_B^{(3)} &= 0,173 \frac{L}{a} k_L [I_{\Pi 0}^{(3)}]^2 T_a k_a, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} k_L &= \sqrt{1 + \left(\frac{a}{L}\right)^2} - \frac{a}{L}; \\ k_a &= 1 - e^{-\frac{2t_k}{T_a}}; \end{aligned}$$

$k_a$  – продолжительность КЗ, с;

$T_a$  – постоянная времени цепи КЗ, с;

$L$  – длина пролета, м;

$a$  – расстояние между проводами соседних фаз, м;

$I_{\Pi 0}$  – начальный периодический ток КЗ, кА;

$S^{(2)}$ ,  $S_{A,C}^{(3)}$ ,  $S_B^{(3)}$  – соответственно импульсы ЭДУ двух- и трехфазного КЗ для крайних и средней фаз, Нс.

Более точный расчет импульсов электродинамических усилий можно выполнить с помощью диаграмм. Величины импульсов ЭДУ при заданных токе и длине пролета вычисляются следующим образом:

$$S = 2 \frac{L}{a} S_{\text{ед}} k_L I^2,$$

где  $S_{\text{ед}}$  – найденный по диаграмме импульс ЭДУ при  $I = 1$  А;  $L = 1$  м и  $a = 1$  м.

Согласно ГОСТ проверка отклонений и сближений гибких проводов распределительного устройства производится по условию

$$R_{\text{max}} \leq R_{\text{дон}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{дон}}$  – соответственно максимальное и допустимое отклонения проводов при КЗ.

Для фаз гибкой ошиновки РУ, расположенных практически в горизонтальной плоскости, условие (2) записывается в виде:

$$\begin{aligned} A_{\phi-3} - Y_{A \text{max}} &\geq A_{\phi-3 \text{ min don}}; \\ A_{\phi-\phi} - (Y_{A \text{max}} + Y_{B \text{max}} + 2r_p) &\geq A_{\phi-\phi \text{ min don}}, \end{aligned}$$

где  $A_{\phi-\phi}$ ,  $A_{\phi-3}$ ,  $A_{\phi-3 \text{ min don}}$ ,  $A_{\phi-\phi \text{ min don}}$  – соответственно установленные ПУЭ и проектными материалами расстояния между фазами, между фазами и заземленными частями, а также их минимальные допустимые значения при сближении;

$Y_{A \text{max}}$ ,  $Y_{B \text{max}}$  – максимальные горизонтальные отклонения фаз при КЗ;

$r_p$  – радиус провода или радиус расщепленной фазы.

Наибольшее приближение крайней фазы к заземленным конструкциям имеет место при трехфазном КЗ, так как  $S_{A,C}^{(3)} > S^{(2)}$ . Максимальное сближение соседних фаз гибких шин наблюдается при двухфазном КЗ, когда они сближаются после отключения КЗ в результате колебаний проводов. Общепринято, что максимальные отклонения фаз при сближении равны их максимальным отклонениям при отталкивании ЭДУ.

С учетом сказанного получим выражение для допустимых горизонтальных отклонений проводов:

$$Y_{\partial on}^{(3)} = A_{\phi-z} - A_{\phi-z \min \partial on};$$

$$Y_{\partial on}^{(2)} = 0,5(A_{\phi-\phi} - A_{\phi-\phi \min \partial on}) - r_p.$$

Например, для проводов ячейки ОРУ 110 кВ при  $a = 2,5$  м  $Y_{\partial on} = 0,975$  м, а для проводов сборных шин –  $Y_{\partial on} = 1,125$  м. Используя явную формулу для  $Y_{\max}$ , принимаем  $Y_{\max} = Y_{\partial on}$  и устанавливаем взаимосвязь между  $Y_{\partial on}$  и  $S_{\partial on}$ , при которой максимальные отклонения становятся равными допустимым значениям. При выводе формул расчета  $S_{\partial on}$  уравнение энергетического баланса провода при КЗ запишем в следующем виде:

$$0,75J \left( \frac{S_{\partial on}}{\rho l f_0} \right)^2 = \frac{2}{3} \cdot \rho l f_0 g (\cos \alpha_k - \cos \alpha_{\partial on}), \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  – угол отклонения провода в момент отключения КЗ, рад;

$\alpha_{\partial on}$  – то же при максимальном горизонтальном отклонении.

Для тяжелых проводов больших сечений сборных шин в пролетах ОРУ, составляющих несколько десятков метров, при продолжительности КЗ в диапазоне 0,1–0,2 с (исходя из времени действия основных защит) величиной  $\alpha_k$  пренебрегаем.

Тогда

$$\cos \alpha_k \approx 1$$

и

$$\cos \alpha_{\partial on} = \frac{\sqrt{f_0^2 - \left( \frac{Y_{\partial on}}{k_S} \right)^2}}{f_0}, \quad (4)$$

где  $k_S$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение формы провода при КЗ.

После подстановки (4) в (3) и преобразований получим приближенную формулу для расчёта допустимого импульса электродинамических усилий

$$S_{\partial on} = 3,3\rho l \sqrt{f_0 - \sqrt{f_0^2 - \left( \frac{Y_{\partial on}}{k_S} \right)^2}}. \quad (5)$$

Зная допустимый импульс ЭДУ, можно записать дополнительное условие проверки недопустимых сближений проводов при КЗ в виде

$$S \leq S_{\partial on},$$

где  $S$  – расчётный импульс ЭДУ, определяемый в зависимости от вида и величины тока КЗ по (1).

Простая структура формулы (5) позволяет выполнить расчеты  $S_{\partial on}$  для наиболее часто используемых типовых проектов ЗРУ 110, 220 и 330 кВ. Наличие в ней коэффи-

циента  $k_S$ , являющегося функцией импульса ЭДУ, требует построения итерационного процесса:

- 1)  $k_S$  принимается равным единице;
- 2) определяется при заданных параметрах и размерах гибких шин  $S_{don}$ ;
- 3) по кривым  $k_S = f\left(\frac{S}{\rho l}\right)$  находится величина  $k'_S$  и повторяется расчет  $S_{don}$ .

Для получения удовлетворительного результата достаточно выполнить две-три итерации по  $k_S$ . Подставим в формулу (1) вместо импульса ЭДУ  $S_{don}$  и определим допустимые токи (токи электродинамической стойкости) по условию сближения фаз при двухфазном КЗ. Определим при указанных токах по КП BUSEF  $Y_{\max КП}$  и сравним с  $Y_{don}$ . Погрешность  $\Delta Y$  не превышает 10 %. Аналогично можно найти  $S_{don}$  по условию допустимого приближения фаз гибкой ошиновки к заземлённым конструкциям РУ. Поскольку импульс ЭДУ трехфазного КЗ для крайних фаз несколько больше, чем при двухфазном КЗ, в этом случае расчётный импульс ЭДУ определяется при трёхфазном КЗ.

### Литература

1. Сергей, И.И., Стрелок, М.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
2. Сергей, И.И., Пономаренко, Е.Г., Самур Ваиль Махмуд. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9.

УДК 621.311.1.014

## КООРДИНАЦИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Половченя А.И., Полегошко О.Р., Шиммель А.С.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент СИЛЮК С.М.

Причинами возникновения переходных процессов могут быть:

- повторные включения и отключение короткозамкнутых сетей;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы СЭС;
- асинхронный ход синхронных машин после их выпадения из синхронизма;
- реверсирование асинхронных двигателей;
- асинхронный пуск синхронных двигателей и синхронных компенсаторов;
- внезапные наброски и сбросы нагрузки;
- короткие замыкания в элементах СЭС;
- форсировка возбуждения синхронных машин и гашение их магнитного поля;
- появление несимметрии фазных токов и напряжений через отключение отдельных фаз, несимметричные изменения нагрузки фаз, обрывы фазных проводников и т. п.;
- включение, выключение или переключение источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электропотребителей и других элементов.

Рост уровней токов КЗ предъявляет повышенные требования в отношении электродинамической и термической стойкости элементов электротехнических устройств энергосистем, а также коммутационной способности электрических аппаратов. С целью