

IV. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.35.064.1

М.И. СТРЕЛЮК, И.И. СЕРГЕЙ, Ю.В. БЛАДЫКО

ПРОВЕРКА МНОГОПРОЛЕТНЫХ ГИБКИХ ШИН ЗРУ НА СХЛЕСТЫВАНИЕ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Проверка гибких шин закрытых распределительных устройств (ЗРУ) на схлестывание при коротких замыканиях (КЗ) производится расчетом динамики многопролетной конструкции с гибкими шинами и гирляндами изоляторов как единой колебательной системы [1]. При этом предполагается, что ток КЗ протекает одновременно по проводам всех шинных пролетов ЗРУ. Однако вероятнее протекание тока КЗ в пределах участка гибких шин ЗРУ, ограниченного точками присоединения отпаяк рядом расположенных ячеек трансформатора и линии электропередачи (рис. 1). В этом случае размах колебаний гибких шин при КЗ может оказаться больше, так как имеют место не только поперечные, но и продольные относительно пролета отклонения гирлянд изоляторов под действием электродинамических усилий (ЭДУ), что приводит к вытяжке проводов из смежных пролетов в пролет, обтекаемый током КЗ.

В данной работе излагается приближенная математическая модель расчета гибких шин многопролетной конструкции ЗРУ на схлестывание при протекании тока КЗ в пределах одного пролета гибких шин ЗРУ. Действие проводов смежных пролетов на гирлянды расчетного заменяется реакциями связей. Для определения реакций связей разработана математическая модель, учитывающая мгновенное пространственное расположение всех смежных пролетов гибких шин ЗРУ при протекании токов КЗ по проводам расчетного пролета.

В общем случае на конец подвесной гирлянды изоляторов при КЗ от проводов действует сила $\bar{P} = \bar{F} + \bar{R}$, где \bar{F} – вектор усилия, действующего на зажим гирлянды от проводов расчетного пролета; \bar{R} – реакция связей, заменяющая действие проводов смежного участка ЗРУ.

Вектор силы \bar{F} определяется из решения уравнений динамики гибких шин расчетного пролета при КЗ [2]. В силе, заменяющей действие проводов смежных пролетов, выделяются две составляющие: статическая реакция связей \bar{T} и сила инерции \bar{J} всего примыкающего к расчетному смежного участка гибких шин ЗРУ, т. е. $\bar{R} = \bar{T} + \bar{J}$.

Сила инерции смежного участка определяется по выражению

$$\bar{J} = M_{\text{ип}} \frac{d^2 \Delta \bar{R}_r}{dt^2},$$

где $M_{\text{ип}}$ – приведенная масса смежного участка гибких шин ЗРУ; $\Delta \bar{R}_r$ – век-

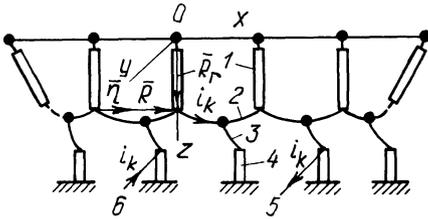


Рис. 1. Упрощенная конструктивная схема пролета ЗРУ:

- 1 – подвесная гирлянда изоляторов; 2 – провод; 3 – спуск к электрическому аппарату; 4 – электрический аппарат; 5 – ответвления к линии электропередачи; 6 – ответвления от трансформатора

тор отклонения подвесной гирлянды расчетного пролета относительно первоначального положения.

Для определения силы \bar{T} строится статическая характеристика смежного многопролетного участка, связывающая силу \bar{T} с вектором отклонения подвесной гирлянды изоляторов в расчетном пролете. При построении этой характеристики используются условия равновесия системы n пролетов и подвесных гирлянд изоляторов смежного многопролетного участка гибких шин ЗРУ. Одно из условий равновесного состояния i -го пролета смежного участка устанавливает связь между тяжением и изменением длины пролета

$$\Delta l_i = \frac{l_0^3 p^2}{24} \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_i^2} \right) + l_0 \frac{T_i - T_0}{EA}, \quad (1)$$

где Δl_i – изменение длины пролета, м; l_0 – первоначальная длина пролета, м; p – погонная масса проводов фазы, кг/м; T_0 – первоначальное тяжение, даН; E – модуль упругости провода, даН/мм²; A – площадь сечения проводов фазы, мм²; n – число пролетов смежного участка.

Вторым условием равновесия является уравнение статики отклоненной гирлянды изоляторов [3]

$$(\bar{R}_r^0 + \Delta \bar{R}_{ri}) (\Delta \bar{T}_i + \bar{P}_r/2) = 0; \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где \bar{R}_r^0 – первоначальный вектор, характеризующий неотклоненное положение гирлянды изоляторов (см. рис. 1); $\Delta \bar{T}_i$ – вектор разности тяжений в соседних пролетах гибких шин ЗРУ; \bar{P}_r – сила тяжести гирлянды изоляторов.

Уравнения (1) и (2) дополняются условиями статической совместности проводов и гирлянды изоляторов пролетов смежного участка ЗРУ:

$$\Delta \bar{R}_{ri} = \bar{R}_i - \bar{R}_0 + \Delta \bar{R}_{r(i-1)}; \quad i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$\bar{T}_{i+1} = \bar{T}_i + \Delta \bar{T}_i. \quad (4)$$

Здесь

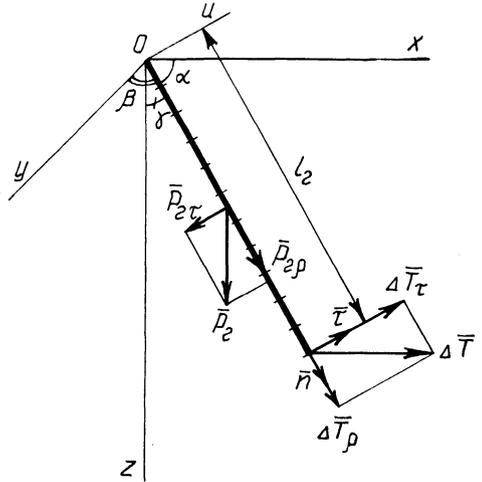
$$\bar{R}_i = l_i \bar{\eta}_i; \quad (5)$$

$$l_i = l_0 + \Delta l_i; \quad (6)$$

$$\bar{\eta}_i = \bar{T}_i / T_i; \quad (7)$$

$$T_i = \sqrt{T_{xi}^2 + T_{yi}^2 + T_{zi}^2}, \quad (8)$$

Рис. 2. К решению уравнений статики гирлянды



где \bar{R}_0 — первоначальный вектор, соединяющий зажимы соседних гирлянд изоляторов (см. рис. 1).

При выводе выражений (2)–(8) допускалось, что вектор тяжения \bar{T} направлен по прямой, соединяющей зажимы соседних гирлянд изоляторов, а гирлянда является прямолинейным стержнем.

Из совместного решения уравнений (1)–(8) необходимо получить статические характеристики $\bar{T}_n = f(\Delta \bar{R}_n)$. Решение этой задачи проводится в следующем порядке. По заданному тяжению \bar{T}_1 в первом пролете из выражения (7) определяется единичный вектор $\bar{\eta}_1$, направленный вдоль пролета. Затем по формуле (1) определяется изменение длины первого пролета Δl_1 по направлению вектора $\bar{\eta}_1$. Далее по выражению (3) вычисляется вектор отклонения первой гирлянды $\Delta \bar{R}_{r1}$. Завершает расчет первого пролета определение вектора изменения тяжения $\Delta \bar{T}_1$.

Из уравнения (2) можно найти только составляющую вектора $\Delta \bar{T}$, вызывающую вращательное движение гирлянды как твердого тела (ΔT_τ). Вторая составляющая $\Delta \bar{T}$, представляющая собой его проекцию на направление гирлянды изоляторов, определяется по закону Гука, как для прямолинейного стержня (ΔT_ρ).

Для определения составляющей ΔT_τ уравнение (2) проектируется на ось u , перпендикулярную направлению гирлянды и лежащую в плоскости, в которой расположены гирлянда и действующие на нее силы (рис. 2):

$$\Delta T_\tau l_\Gamma - P_{\Gamma\tau} l_\Gamma / 2 = 0, \quad (9)$$

где ΔT_τ , $P_{\Gamma\tau}$ — проекции векторов $\Delta \bar{T}$ и \bar{P}_Γ на ось u ; l_Γ — длина гирлянды изоляторов.

Выражая $P_{\Gamma\tau}$ через вес гирлянды и угол ее отклонения от первоначального положения γ , из (9) получим

$$\Delta T_\tau = \frac{1}{2} P_\Gamma \sin \gamma.$$

Здесь

$$\gamma = \arccos \frac{l_r + \Delta z_r}{l_r},$$

где Δz_r – проекция вектора $\Delta \bar{R}_r$ на ось z .

Исходя из закона Гука, после несложных преобразований получим выражение для расчета составляющей ΔT_ρ

$$\Delta T_\rho = (|\bar{R}_r + \Delta \bar{R}_r| - l_r) / (\alpha_r l_r) + P_r (\cos \gamma - 1) / 2,$$

где α_r – коэффициент упругого удлинения гирлянды.

Таким образом, вектор силы $\Delta \bar{T}$ равен

$$\Delta \bar{T} = \Delta T_\rho \bar{n} + \Delta T_\tau \bar{\tau},$$

где $\bar{n}(\cos \alpha; \cos \beta; \cos \gamma)$ – единичный вектор, направленный вдоль гирлянды (см. рис. 2):

$$\bar{n} = \frac{\bar{R}_r^0 + \Delta \bar{R}_r}{|\bar{R}_r^0 + \Delta \bar{R}_r|},$$

где $\bar{\tau}$ – единичный вектор, перпендикулярный гирлянде и лежащий в плоскости действующих на нее сил.

Проекции вектора $\bar{\tau}$ на оси декартовой системы координат определяются из следующих условий:

1) перпендикулярности векторов $\bar{\tau}$ и \bar{n} :

$$\tau_x \cos \alpha + \tau_y \cos \beta + \tau_z \cos \gamma = 0; \quad (10)$$

2) компланарности векторов \bar{n} , $\bar{\tau}$ и единичного вектора \bar{k} , направленного по оси z :

$$\begin{vmatrix} \tau_x & \tau_y & \tau_z \\ \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0; \quad (11)$$

3) $\tau_z = -\sin \gamma$ (см. рис. 2).

Выполнив преобразования, из (10) и (11) получим выражения для расчета проекций $\bar{\tau}$ в следующем виде:

$$\tau_x = \frac{\sin 2\gamma \cos \alpha}{2(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta)}; \quad \tau_y = \frac{\sin 2\gamma \cos \beta}{2(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta)}.$$

Порядок вычислений для последующих пролетов практически аналогичен вышеуказанному для первого пролета. Разница в ходе вычислительного процесса для этих пролетов заключается в том, что тяжение не задается, а определяется тяжением в предыдущем пролете по выражению (4). Задаваясь различными значениями проекций вектора \bar{T}_1 , получим в результате этого расчета семейство статических характеристик $\bar{T}_n = f(\Delta \bar{R}_{rn})$ в виде массивов чисел.

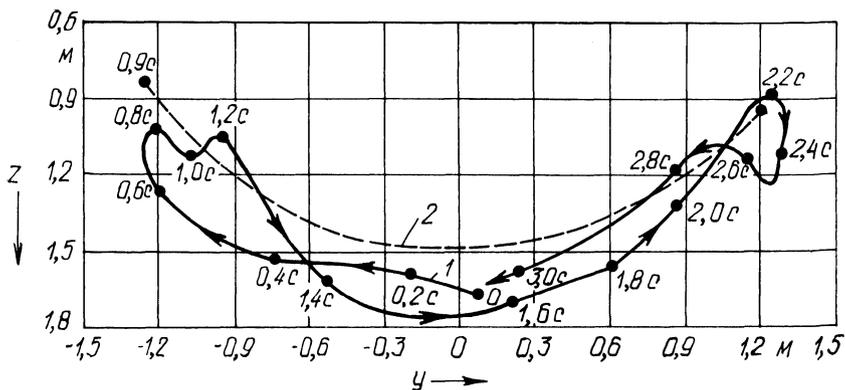


Рис. 3. Траектории движения точки крепления спуска к шине и конца подвесной гирлянды изоляторов (тип провода 2 х АС-300/39; гирлянда 9 х ПС 70Д; длина сборных шин 66 м; длина пролета 6 м; междуфазное расстояние 2 м; начальное тяжение 700 Н; параметры двухфазного КЗ: ток 35 кА, продолжительность 0,75 с, постоянная времени цепи КЗ 0,26 с); 1 – траектория движения точки крепления спуска; 2 – траектория движения конца гирлянды.

Мгновенное положение гирлянды изоляторов в расчетном пролете описывается динамическими уравнениями Эйлера [3]. Алгоритм решения этих уравнений изложен в [4] и в данной работе не приводится.

По разработанному алгоритму составлена программа расчета на ЭВМ гибких шин ЗРУ на схлестывание при КЗ. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета по составленной программе гибких шин типового ЗРУ 110 кВ. Как видно из рисунка, при токе КЗ в 35 кА угол отклонения гирлянд изоляторов в направлении, перпендикулярном пролету, достигает 50° ; примерно через 2 с после начала КЗ наступает схлестывание проводов. Продольные относительно пролета отклонения гирлянд составили 0,07 м.

Таким образом, разработанные алгоритм и программа позволяют выполнить расчет гибких шин на схлестывание при любом количестве пролетов в ЗРУ, а также оценить эффективность различных конструктивных решений, направленных на повышение электродинамической стойкости гибких шин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелюк М.И., Сергей И.И., Бладыко Ю.В. Влияние подвесных гирлянд изоляторов на электродинамическую стойкость гибкой ошиновки ЗРУ // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1986. – № 9. – С. 3–7.
2. Стрелюк М.И., Сергей И.И. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки открытых распределительных устройств высокого напряжения // Электричество. – 1984. – № 1. – С. 10–14.
3. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. – М.: Наука, 1972. – Ч. 2. – 332 с.
4. Стрелюк М.И., Сергей И.И. Влияние расщепления фазы гибкой ошиновки ОРУ на динамику ее параметров при коротких замыканиях // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1981. – № 4. – С. 6–12.