

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1:537.312.62

Г.Е.Поспелов, докт.техн.наук,
В.Т.Федин, канд.техн.наук

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КООКСИАЛЬНЫМИ ФАЗАМИ

Ввиду сложности физических процессов в линиях электропередачи с коаксиальными фазами (газовых, криогенных и др.) не всегда удается наглядно описать аналитические связи между отдельными параметрами. В этих условиях может оказаться полезным для анализа параметров различных линий и их моделей применение методов теории подобия.

Получим критерии подобия применительно к сверхпроводящим линиям. Для этого воспользуемся методом анализа размерностей [1] и процедурой его применения, описанной в [2].

Для линий электропередачи со сверхпроводниками первого рода или сверхпроводниками второго рода, работающими при напряженности поля меньше первого критического поля ($H < H_{k1}$), т.е. когда ток имеет место только на поверхности сверхпроводника, в качестве определяющих величин могут быть приняты следующие [3]: расчетная мощность линии P , напряжение между проводниками коаксиальной фазы U , напряженность первого критического поля H_{k1} при данной рабочей температуре фаз, электрическая прочность электроизоляции $E_{пр}$, абсолютная магнитная проницаемость электроизоляции μ , абсолютная электрическая проницаемость электроизоляции ϵ , угловая частота ω , удельное реактивное сопротивление линии x_{Ω} , удельная реактивная проводимость b_{Ω} , коэффициент запаса по критическому току сверхпроводника k_I , коэффициент запаса по электрической прочности изоляции k_U .

Формулы размерностей этих величин в СИ имеют вид:

$$\begin{aligned} [P] &= L^2 M T^{-3}; [U] = L^2 M T^{-3} I^{-1}; [H_{k1}] = L^{-1} I; [E_{пр}] = \\ &= L M T^{-3} I^{-1}; [\mu] = L M T^{-2} I^{-2}; [\epsilon] = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2; [\omega] = T^{-1}; \\ [x_{\Omega}] &= L M T^{-3} I^{-2}; [b_{\Omega}] = L^{-3} M^{-1} T^3 I^2; [k_I] = 1; k_U = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, все определяющие величины выражены через $q = 4$ единиц измерений (L, M, T, I).

Поскольку величины k_I и k_U — безразмерные, то сразу можно записать два критерия подобия:

$$\pi_1 = k_I; \quad \pi_2 = k_U.$$

Из остальных величин составим степенную функцию

$$\Phi = P^a U_k^b H_{k1}^c E_{пр}^d \mu^e \epsilon^f \omega^g x_o^p b_o^r, \quad (1)$$

имеющую размерность

$$[\Phi] = [L^2 M T^{-3}]^a [L^2 M T^{-3} I^{-1}]^b [L^{-1} I]^c [L M T^{-3} I^{-1}]^d x \\ \times [L M T^{-2} I^{-2}]^e [L^{-3} M^{-1} T^4 I^2]^f [T^{-1}]^g [L M T^{-3} I^{-2}]^p x \\ \times [L^{-3} M^{-1} T^3 I^2]^r = 1.$$

Составим отсюда систему из $q = 4$ уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2a+2b-c+d+e-3f+p-3r &= 0; \\ a+b+d+e-f+p-r &= 0; \\ -3a-3b-3d-2e+4f-g-3p+3r &= 0; \\ -b+c-d-2e+2f-2p+2r &= 0; \end{aligned} \right\}$$

Выразим отсюда a, b, c, g через d, e, f, p, r :

$$\begin{aligned} a &= d+2e+2p; \\ b &= -2d-3e+f-3p+r; \\ c &= -d-e-f-p-r; \\ g &= e+f. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значения из (2) в (1), получим

$$\Phi = P^{d+2e+2p} U_k^{-2d-3e+f-3p+r} H_{k1}^{-d-e-f-p-r} x$$

$$x E_{\text{пр}}^d \mu^e \varepsilon^f \omega^{e+f} \cdot \underset{\circ}{p} \underset{\circ}{b} \underset{\circ}{r},$$

или

$$\phi = (P U_k^{-2} H_{k1}^{-1} E_{\text{пр}})^d (P^2 U_k^{-3} H_{k1}^{-1} \mu \omega)^e (U_k H_{k1} \varepsilon \omega)^f x$$

$$x (P^2 U_k^{-3} H_{k1}^{-1} x_o)^p (U_k H_{k1}^{-1} b_o)^r.$$

Отсюда получим критерии подобия

$$\pi_3 = \frac{P E_{\text{пр}}}{U_k^2 H_{k1}}; \quad \pi_4 = \frac{P^2 \mu \omega}{U_k^3 H_{k1}}; \quad \pi_5 = \frac{U_k \varepsilon \omega}{H_{k1}};$$

$$\pi_6 = \frac{P^2 x_o}{U_k^3 H_{k1}}; \quad \pi_7 = \frac{U_k b_o}{H_{k1}}.$$

Преобразуем полученные критерии

$$\pi_4' = \frac{\pi_4}{\pi_6} = \frac{\omega \mu}{x_o}; \quad \pi_5' = \frac{\pi_5}{\pi_7} = \frac{\omega \varepsilon}{b_o};$$

$$\pi_3' = \frac{\pi_3}{\pi_4'} = \frac{E_{\text{пр}} x_o P}{\omega \mu H_{k1} U_k^2}; \quad \pi_3'' = \pi_3 \pi_5' = \frac{\omega \varepsilon E_{\text{пр}} P}{H_{k1} b_o U_k^2}.$$

С учетом π_1 и π_2 окончательно получим:

$$\pi_1' = \pi_3' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{k_I E_{\text{пр}} x_o P}{\omega \mu k_u H_{k1} U_k^2};$$

$$\pi_1'' = \pi_3'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\omega \varepsilon k_I E_{\text{пр}} P}{k_u H_{k1} b_o U_k^2}.$$
(3)

В электропередачах со сверхпроводниками второго рода, работающими при напряженности поля между первым и вторым

критическими полями ($H_{k_1} < H < H_{k_2}$), ток проникает во все сечение проводника, и важными величинами при выборе параметров линии являются критическая плотность тока j_k и толщина сверхпроводника n_{sp} . Поэтому эти величины возьмем в качестве определяющих вместо H_{k_1} . Остальные величины выберем те же, что и раньше.

Тогда первые два критерия останутся прежними:

$$\pi_1 = k_1; \quad \pi_2 = k_u.$$

Для нахождения остальных критериев составим степенную функцию в виде

$$\Phi = P^a U_k^b J_k^c n_{sp}^d E_{пр}^e \mu^f \epsilon^g \omega^p x_0^r b_0^k. \quad (4)$$

Ее размерность

$$\begin{aligned} [\Phi] &= [L^2 M T^{-3}]^a [L^2 M T^{-3} I^{-1}]^b [L^{-2} I]^c [L]^d \times \\ &\times [L M T^{-3} I^{-1}]^e [L M T^{-2} I^{-2}]^f [L^{-3} M^{-1} T^4 I^2]^g \times \\ &\times [T^{-1}]^p [L M T^{-3} I^{-2}]^r [L^{-3} M^{-1} T^3 I^2]^k = 1. \end{aligned}$$

Отсюда система из $q = 4$ уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2a+2b-2c+d+e+f-3g+r-3k &= 0; \\ a+b+e+f-g+r-k &= 0; \\ -3a-3b-3e-2f+4g-p-3r+3k &= 0; \\ -b+c-e-2f+2g-2r+2k &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решив ее относительно a, c, d, p , получим

$$a = -b - e - f + g - r + k;$$

$$c = b + e + 2f - 2g + 2r - 2k;$$

$$d = 2b + 3e + 5f - 3g + 5r - 3k;$$

$$p = f + g.$$

Подставляя (5) в (4), найдем

$$\phi = P^{-b-e-f+g-r+k} U_k j_k b_k^{b+e+2f-2g+2r-2k} x$$

$$x n_{\text{сп}}^{2b+3e+5f-3g+5r-3k} E_{\text{пр}}^e \mu^f \varepsilon^g \omega^{f+g} x_o^r b_o^k$$

или

$$\Phi = (P^{-1} U_k j_k n_{\text{сп}}^2)^b (P^{-1} j_k n_{\text{сп}}^3 E_{\text{пр}})^e (P^{-1} j_k n_{\text{сп}}^5 \mu \omega)^f x$$

$$x (P j_k^{-2} n_{\text{сп}}^{-3} \varepsilon \omega)^g (P^{-2} j_k^2 n_{\text{сп}}^5 x_o)^r (P j_k^{-2} n_{\text{сп}}^{-3} b_o)^k.$$

Отсюда критерии подобия

$$\pi_3 = \frac{U_k j_k n_{\text{сп}}^2}{P}; \quad \pi_4 = \frac{j_k n_{\text{сп}}^3 E_{\text{пр}}}{P}; \quad \pi_5 = \frac{j_k n_{\text{сп}}^5 \mu \omega}{P};$$

$$\pi_6 = \frac{P \varepsilon \omega}{j_k^2 n_{\text{сп}}^3}; \quad \pi_7 = \frac{j_k^2 n_{\text{сп}}^5 x_o}{P}; \quad \pi_8 = \frac{P b_o}{j_k^2 n_{\text{сп}}^3};$$

Преобразуем критерии π_3, \dots, π_8 :

$$\pi_5' = \frac{\pi_5}{\pi_7} = \frac{\omega \mu}{x_o}; \quad \pi_6' = \frac{\pi_6}{\pi_8} = \frac{\omega \varepsilon}{b_o}; \quad \pi_4' = \frac{E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{U_k};$$

$$\pi_5'' = \frac{\pi_4'}{\pi_5'} = \frac{E_{\text{пр}} n_{\text{сп}} x_o}{\omega \mu U_k}; \quad \pi_6'' = \pi_4' \pi_6' = \frac{\omega \varepsilon E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{U_k b_o}.$$

С учетом π_1 и π_2 получим

$$\pi_1' = \pi_5'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{k_I E_{\text{пр}} n_{\text{сп}} x_o}{\omega \mu k_u U_k};$$

$$\pi_1'' = \pi_6'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\omega \varepsilon k_I E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{k_u U_k b_o}.$$

(6)

Отсюда следует, что величины P и j_k оказались лишними.

Из критериев (3) следует, что для линий со сверхпроводниками, работающими при $N < N_{k1}$, реактивное сопротивление x_0 прямо пропорционально квадрату номинального напряжения линии и обратно пропорционально расчетной мощности в первой степени. Реактивная проводимость b_0 прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна квадрату номинального напряжения.

Анализ критериев (6) показывает, что для линий со сверхпроводниками, работающими при $N_{k1} < N < N_{k2}$, зависимости x_0 и b_0 от расчетной мощности косвенные через коэффициент k_I и толщину сверхпроводника $n_{сп}$. Между x_0 и напряжением линии имеется прямая пропорциональность, а между b_0 и напряжением — обратная пропорциональность.

Л и т е р а т у р а

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М., 1976. 2. Лебедев А.Н. Простейший формальный метод определения критериев подобия при анализе размерностей. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, №4. 3. Бережной А.В., Федин В.Т. Криогенные электропередачи. Минск, 1977.

УД К 321.311.1:321.315.05

А.В.Бережной, канд.техн.наук,
В.Г.Королюк

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ОПЛЕТОК С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Стабилизация — это система мероприятий, снижающих вероятность возникновения нормальной зоны или предотвращающих распространение ее по сверхпроводящему кабелю. Наиболее простым инженерным решением стабилизации является шунтирование сверхпроводника некоторым количеством нормального металла, который обладает хорошими электрической и тепловой проводимостями. Принцип стабилизации заключается в том, что при нарушении сверхпроводимости (локально или повсеместно) осуществляется перераспределение токов между сверхпроводником и шунтирующим металлом. В работах [1 и др.] рассматривались вопросы стабилизации сверхпроводящих магнитных