

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СЕЧЕНИЯ КРИОРЕЗИСТИВНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Криорезистивные кабельные линии переменного тока за счет глубокого охлаждения токопроводящих фаз позволяют передавать мощность при больших токах (несколько тысяч ампер). При токах больше 1000 А в них значительно проявляется поверхностный эффект, в результате чего ток по сплошному сечению фазы распределяется резко неравномерно, вытесняясь на поверхность. Глубина проникновения электромагнитного поля определяется по формуле [1, 2]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho(T)}{\pi f \mu(T) \mu_0}}, \quad (1)$$

где f - частота переменного тока; T - рабочая температура фаз; $\rho(T)$ - удельное сопротивление материала фазы, зависящее от принятой рабочей температуры; $\mu(T)$ - магнитная проницаемость проводника; μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Вследствие вытеснения тока на поверхность фазы криорезистивных линий целесообразно выполнять полыми и их полости использовать для прокачки хладагента. Наиболее выгодная толщина стенки цилиндрической трубы оказывается несколько больше, чем глубина проникновения [1]. Для меди и алюминия она составляет $m\delta$, где $m = (1,34 \div 1,47)$.

По условию снижения теплопритоков из внешней среды в зону низких температур диаметры фаз должны выбираться как можно меньше. Минимальный средний диаметр фазы, при котором толщина стенки трубы наиболее эффективно используется для пропускания нагрузки, может быть определен по формуле

$$d_{\text{ср}} \approx \frac{s_{\text{э}}}{\pi m \delta}, \quad (2)$$

где $s_{\text{э}}$ - экономическое сечение проводника фазы.

Таким образом, диаметр фазы оказывается жестко зависимым от экономического сечения. Имея в виду это обстоятельство, капитальные затраты в криорезистивную кабельную линию можно представить в следующем виде:

$$K = K_0 + K_s. \quad (3)$$

Составляющая K_o не влияет на выбор экономического сечения фазы и при фиксированном значении последнего определяется исключительно диаметром фазы. Она включает в себя капитальные затраты на электроизоляцию $K_{эи}$, хладагент $K_{ха}$, теплоизоляцию $K_{ти}$ и часть рефрижераторных установок $K_{реф_{тп}}$, которая используется для компенсации теплопритоков из внешней среды:

$$K_o = K_{эи} + K_{ха} + K_{ти} + K_{реф_{тп}}. \quad (4)$$

Составляющая K_s зависит от сечения фазы и для трехфазного кабеля может быть представлена в виде

$$K_s = K_{п} + K_{реф_{\Delta P}} = 3 \gamma_{п} c_{п} s l + 3 I^2 \frac{\rho(T)}{s} l k_y(T), \quad (5)$$

где $K_{п}$ - стоимость материала проводников; $K_{реф_{\Delta P}}$ - капитальные затраты на часть рефрижераторных установок, необходимую для компенсации тепловыделений, связанных с потерями мощности в фазах криорезистивной линии; $k_y(T)$ - стоимость единицы установленной мощности рефрижераторов; $\gamma_{п}$ - плотность материала проводника; $c_{п}$ - удельная стоимость материала проводника; I - максимальный ток; l - длина линии.

Годовые эксплуатационные расходы, зависящие от сечения, складываются из отчислений на амортизацию и текущий ремонт проводников фаз Γ_1 и рефрижераторных установок Γ_2 , стоимости потерь энергии в кабеле Γ_3 , стоимости энергии Γ_4 в рефрижераторных установках, идущей на компенсацию потерь энергии в кабеле:

$$\Gamma_s = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 = r_{п} K_{п} + r_{р} K_{реф_{\Delta P}} + 3 I^2 \frac{\rho(T)}{s} l \tau \beta + 3 I^2 \frac{\rho(T)}{s} l \tau \beta h(T), \quad (6)$$

где $r_{п}$ и $r_{р}$ - соответственно отчисления на амортизацию и текущий ремонт проводников фаз и рефрижераторных установок; τ - время потерь; $h(T)$ - затраты мощности в рефрижераторных установках на отвод единицы тепла из холодной зоны.

Тогда экономическое сечение фаз, соответствующее минимуму расчетной стоимости передачи электроэнергии [3], определится из выражения приведенных затрат

$$Z = p_H K_S + \Gamma_S \rightarrow \min. \quad (7)$$

Подставив в (7) значения K_S из (5) и Γ_S из (6) и произведя преобразования, получим

$$Z = 3 \gamma_{\Pi} c_{\Pi} l (p_H + p_{\Pi}) S + 3 I^2 \frac{\rho(T)}{S} l \left[k_y(T) (p_H + p_p) + (1 + h(T)) \tau \beta \right] \rightarrow \min. \quad (8)$$

Экономическое сечение фазы найдем из выражения

$$\frac{dZ}{dS} = \gamma_{\Pi} c_{\Pi} (p_H + p_{\Pi}) - \frac{I^2 \rho(T)}{S^2} \left[k_y(T) (p_H + p_p) + (1 + h(T)) \tau \beta \right] = 0. \quad (9)$$

Отсюда

$$S_{\ominus} = I \sqrt{\frac{\rho(T) \left[k_y(T) (p_H + p_p) + (1 + h(T)) \tau \beta \right]}{\gamma_{\Pi} c_{\Pi} (p_H + p_{\Pi})}} = \frac{I}{j_{\ominus}}, \quad (10)$$

где экономическая плотность тока

$$j_{\ominus} = \sqrt{\frac{\gamma_{\Pi} c_{\Pi} (p_H + p_{\Pi})}{\rho(T) \left[k_y(T) (p_H + p_p) + (1 + h(T)) \tau \beta \right]}}. \quad (11)$$

Алгоритм выбора параметров проводников фаз криорезистивных линий можно сформулировать в следующем виде.

1. По заданным максимальной мощности и номинальному напряжению линии определяется максимальный ток I .

2. Выбирается тип хладагента и рабочая температура фаз.

3. Выбирается проводниковый материал фаз.

4. По формуле (11) определяется экономическая плотность тока.

5. По формуле (10) определяется экономическое сечение проводников.

6. По формуле (1) находится глубина проникновения электромагнитного поля.

7. По формуле (2) определяется экономически целесообразный диаметр фазы. После подстановки в (2) значений S_{\ominus} из (10) и δ из (1) формула для определения диаметра принимает вид

$$d_{\text{ср}_3} \approx \frac{I}{m} \sqrt{\frac{f \mu(T) \mu_0 \left[k_y(T) (p_H + p_P) + (1+h(T)) \tau \beta \right]}{\pi \gamma_{\text{п}}^2 c_{\text{п}} (p_H + p_P)}}}. \quad (12)$$

Л и т е р а т у р а

1. Мукосеев Ю.Л. Распределение переменного тока в токопроводах. М., - Л., 1959. 2. Проводниковые материалы. Под ред. Л.Ш. Казарновского. М., 1970. 3. Поспелов Г.Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. Минск, 1967.

В.Т. Федин, Ю.В. Белянчев

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕЩЕНИИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ВДОЛЬ ТРАССЫ КРИОГЕННОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Одним из важнейших элементов криогенных линий электропередач являются рефрижераторные установки, стоимость которых по исследованиям разных ученых составляет от 1/5 до 1/4 стоимости всей линии. От размещения рефрижераторных установок по трассе линии зависят условия охлаждения кабеля, а следовательно, и его электрические параметры, в том числе и важнейший из них — передаваемая по криогенной линии мощность.

В [1,2] отмечается, что должно существовать оптимальное размещение рефрижераторных установок по трассе криогенной линии электропередачи, так как в этом вопросе имеются два конкурирующих фактора: величина единичной мощности рефрижераторных установок, изменение которой приводит к изменению удельной стоимости этих установок и расстояния между ними, и вязкостные потери в охлаждающей жидкости.

Увеличение единичной мощности рефрижераторных установок приводит к снижению их числа, стоимости и увеличению расстояния между ними, что вызывает рост вязкостных потерь в охлаждающей жидкости и ухудшение условий охлаждения токоведущих частей. Снижение единичной мощности рефрижераторных