

СОБСТВЕННЫЙ РАСХОД МОЩНОСТИ И К.П.Д.  
КРИОГЕННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Специфика вопроса определения потерь мощности и к.п.д. криогенных линий электропередач связана с созданием и поддержанием в кабеле низких температур, близких к абсолютному нулю, и изменением физической сущности явлений при этих температурах.

Для нормальных режимов работы криогенных линий переменного тока собственный расход мощности в них может быть определен, как

$$P_{с.р} = \Delta R_{\text{КЛЭП}} + P_{о.реф} + P_{п.реф} + P_{в}, \quad (1)$$

где  $\Delta R_{\text{КЛЭП}}$  - потери мощности в криогенной линии, состоящие из потерь в сверхпроводнике (в основном на гистерезис подложке, электроизоляции и экранирующих трубках, а также добавочных потерь в сверхпроводнике, вызываемых колебаниями транспортного тока во времени, включением и отключением линии;  $P_{о.реф}$ ,  $P_{п.реф}$  - мощность, потребляемая рефрижераторными установками основного и промежуточного хладагентов;  $P_{в}$  - мощность, затрачиваемая на поддержание вакуума в рабочем режиме линии.

В сверхпроводящих линиях потери мощности в элементах и на поддержание вакуума малы по сравнению с мощностью рефрижераторных установок и при инженерных расчетах этими потерями можно пренебречь.

Расход мощности на рефрижераторные установки  $P_{реф}$  определяется количеством тепла  $Q$ , которое необходимо постоянно удалять из охлаждаемых зон, т.е.

$$P_{реф} = Q K_{\text{КЭСО}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{КЭСО}}$  - коэффициент эффективности системы охлаждения, равный отношению мощности, потребляемой рефрижераторными установками (Вт), к потерям мощности в криогенном кабеле плюс приток тепла (Вт).

Величина этого коэффициента зависит от к.п.д. цикла Карно, к.п.д. рефрижераторных установок и от совершенства системы циркуляции охлаждающей жидкости, что в свою очередь

зависит от наличия циркуляционных насосов, коэффициента Джоуля – Томпсона и удельной теплоемкости гелия при различных температурах и давлениях, имеющих место в криогенных линиях.

Основными источниками тепла в криогенном кабеле являются:

1) электрические потери в проводниках, включая подложку, и изоляции; 2) теплоприток из зоны нормальных температур к глубоководному слою через теплоизоляцию, конструктивные элементы, токовводы и т.д.; 3) тепло, выделяемое в самой охлаждающей жидкости вследствие вязкостных потерь.

Тепло, отводимое охлаждающей жидкостью:

$$Q = L(q_n + \Delta P_{\text{КЛЭП}} + q_B), \quad (4)$$

где  $L$  – длина криогенного кабеля;  $q_n$  – теплопритоки на участке кабеля единичной длины;  $q_B$  – тепло на единицу длины кабеля, выделяющееся в самих охлаждающих жидкостях вследствие вязкостных потерь.

Теплоприток к глубоководной зоне

$$q_n = q_{\text{л}} + q_{\text{оп}} + q_{\text{Г}} + q_{\text{Т,В}} = \sigma \epsilon \Delta T^4 F + \frac{F_{\text{оп}}}{L_{\text{оп}}} \lambda_{\text{ср}} \Delta T +$$

$$+ 0,243 \frac{F_{\text{н}} \alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 + \frac{F_{\text{н}}}{F} (1 + \alpha_2) \alpha_1} \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} \frac{\rho \Delta T}{\sqrt{MT}} +$$

$$+ 0,5 n q_0 \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 I^2 \rho \lambda_B}{c s V_0^2}} \right), \quad (4)$$

где  $q_{\text{л}}$  – теплоприток посредством лучеиспускания;  $q_{\text{оп}}$  – теплоприток по опорам;  $q_{\text{Г}}$  – теплоприток за счет теплопроводности остаточного газа;  $q_{\text{Т,В}}$  – теплоприток через токовые вводы;  $\sigma$  – константа излучения теплоизолирующих слоев;  $\epsilon$  – приведенная степень черноты;  $\Delta T$  – разность температур между наружной и внутренней поверхностями соответствующих теплоизоляционных слоев;  $F$ ,  $F_{\text{н}}$  – внутренняя и наружная поверхность теплоизолирующего слоя;  $F_{\text{оп}}$ ,  $L_{\text{оп}}$  – поперечное сечение опоры и ее длина;  $\lambda_{\text{ср}}$  – средний коэффициент теплопроводности в интервале температур  $\Delta T$ ;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты аккомодации для остаточного газа;  $M$  – молекулярный вес остаточного газа;  $\gamma_1$  – показатель адиа-

баты;  $q_0$  - теплоприток без токовводов;  $I$  - ток через один токоввод;  $\rho$  - удельное сопротивление материала ввода;  $\lambda_B$  - теплопроводность материала ввода;  $c$  - теплоемкость газа хладагента;  $n$  - количество токовых вводов;  $V_0$  - расход газа без учета теплопритока через ввод.

При определении теплопритока к промежуточному хладагенту четвертое слагаемое в формуле (4) будет отсутствовать.

Вязкостные потери в охлаждающих жидкостях можно найти по следующей формуле:

$$q_B = f u v^3, \quad (5)$$

где  $u$  - сечение охлаждающего канала;  $v$  - скорость течения хладагента;  $f$  - коэффициент потерь в жидкости, который можно считать независимым от скорости течения хладагента.

Коэффициент полезного действия криогенной линии

$$\eta_{\text{КЛЭП}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{\text{ср}}}{P_1} = 1 - \frac{P_{\text{ср}}}{P_1}, \quad (6)$$

где  $P_1$  - передаваемая мощность в начале линии.

Если пренебречь потерями  $\Delta P_{\text{КЛЭП}}$  и расходом мощности на поддержание вакуума линии  $P_B$ , то с достаточной для практических целей степенью точности к.п.д. сверхпроводящей линии можно определить и по формуле

$$\eta_{\text{КЛЭП}} = 1 - \frac{P_{\text{реф}}}{P_1}. \quad (7)$$

Для определения к.п.д. криогенной линии можно использовать коэффициент эффективности электропередачи  $K_{\text{КЭЭ}}$  [1], равный мощности, потребляемой рефрижераторными установками на единицу длины (Вт/км), отнесенной к передаваемой мощности (МВА):

$$K_{\text{КЭЭ}} = \frac{P_{\text{реф}}}{L P_1}. \quad (8)$$

Тогда, учитывая размерность  $K_{\text{КЭЭ}}$ , получим

$$\eta_{\text{КЛЭП}} = 1 - \frac{K_{\text{КЭЭ}} L 10^{-6}}{\cos \varphi}. \quad (9)$$

Коэффициент  $K_{КЭЭ}$  позволяет производить оценку к.п.д. сверхпроводящих линий электропередач.

## Л и т е р а т у р а

1. Forsyth E.B., Garber M., Jensen J.E. Factors influencing the choice of superconductor in ac power transmission applications. — Proc. Appl. Supercond. Conf. New-York, 1972.

Л.И. Птицына

### ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ

При проектировании распределительных сетей определение потерь электроэнергии производится для нормальной схемы сети, с четко определенными точками разреза и условиями работы устройств релейной защиты и автоматики. Однако для электросети большого города величина потерь электроэнергии, подсчитанная для нормальной схемы, будет меньше действительных потерь, так как практически каждый день имеют место отключения схемы от нормальной в связи с повреждениями элементов сети. Наиболее длительные отклонения схемы городской сети обусловлены переходом в неработоспособное состояние кабельных линий, ибо восстановление поврежденного кабеля требует выполнения цикла трудоемких работ.

Увеличение потерь электроэнергии, вызванное текущими эксплуатационными переключениями схемы сети, сопровождается понижением напряжения в ней.

Увеличение потерь напряжения в случае петлевой схемы будет иметь место при выходе из работы любого кабеля петли, кроме нормально ненагруженного. Степень увеличения потерь напряжения в связи с выходом в неработоспособное состояние кабелей сети зависит от положения поврежденного кабеля в петле, интенсивности перехода в неработоспособное состояние, числа ремонтных бригад и ряда других причин.

Автором предложена методика, позволяющая определять математическое ожидание увеличения потерь напряжения в се-