

[电缆]

单芯电缆护层单端或两端直接接地时护层电流的探讨

文/国网台州供电公司 陈 达

国网嘉兴供电公司 温 镇 翁德明

单芯护层电流的大小与护层的连接方式有关，电缆护层电流过大引起电缆发热，降低电缆输出电流的能力，影响电缆的使用寿命。结合运行实际讨论1 km范围内单芯电缆护层连接方式及电缆输出电流与护层电流之间的关系。

单芯电缆护层电流的大小与护层的连接方式有关，一般情况下护层电流为5%的输送电流。护层电流过大会降低电缆输送电流的能力，引起电缆发热，影响电缆的使用寿命。结合电缆的实际运行问题，讨论1 km范围内单芯电缆护层连接方式及电缆输出电流与护层电流之间的关系。

单芯电缆结构

单芯电缆主要由导体线芯、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、半导体电阻水缓冲层、金属铝护套、绝缘屏蔽层、铝护套防护层、外护套和石墨半导体导电层组成。导体屏蔽层可消除导体表面不光滑的影响，达到均匀线芯周围电场的作用。绝缘层具有较强的绝缘作用，避免缆芯与周围的物体放电。绝缘屏蔽部分与金属护套等电位，避免在绝缘层与护套之间发生放电。半导体电阻水缓冲层主要在绝缘屏蔽和金属护套间起缓冲阻水的作用。金属铝护套能够加强电缆承受正向压力的能力，提高电缆抗机械损伤的能力，并能起到一定的电磁屏蔽作用，如果电缆发生破损，流出来的泄漏电流可以沿屏蔽层流入大地。金属护套上的沥青能使电缆达到防腐的目的。石墨半导体导电层附着在外护套上，石墨具有导电作用，以便于做电缆外护套试验。

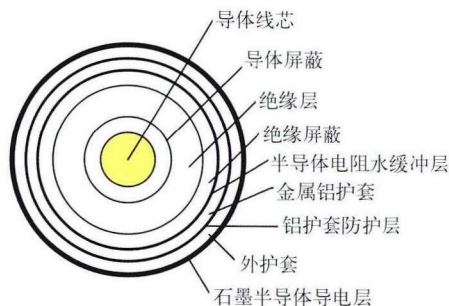


图1 单芯电力电缆结构

单芯电缆两端直接接地时模型的建立

图2为任意排列的三相单芯电缆护层两端直接接地的情况。

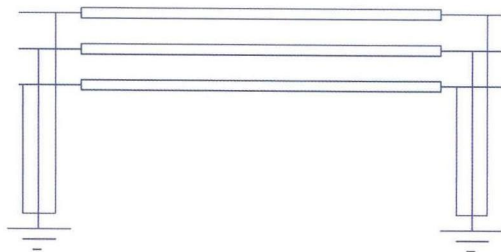


图2 电缆两端直接接地

电缆护层上产生的感应电压主要由电缆输出电流在电缆上产生的感应电压和护层电流之间相互产生的感应电压组成。 E_A 、 E_B 、 E_C 分别为电缆负载电流在电缆护层产生的感应电动势， E'_A 、 E'_B 、 E'_C 分别为护层电流 I_{SA} 、 I_{SB} 、 I_{SC} 产生的感应电

电动势。\$E_A\$、\$E_B\$、\$E_C\$与\$E'_A\$、\$E'_B\$、\$E'_C\$产生的电动势方向相反。假设电缆的长度为\$L\$，电缆护层的自阻抗为\$Z_L\$，互感抗分别为\$X_{AB}\$、\$X_{BC}\$、\$X_{CA}\$。\$R_1\$、\$R_2\$分别为电缆护层两端的接地电阻，\$R_E\$为大地的泄漏电阻。其中

$$Z_L = R + jX$$

式中，\$R = R_s L\$；\$R_E = R_g L\$；\$R_g = \pi^2 f \times 10^{-4} = 0.0000493 \Omega/\text{m}\$；\$R_s\$为电缆护套单位长度电阻。

$$X = 2\omega L l_n 2D_e/D_s$$

式中，\$D_e\$为电缆护套以大地为回路时回路等值深度，\$D_e = 93.18\sqrt{\rho}\$；\$\rho\$为土壤电阻率；\$D_s\$为电缆护套的直径。

电缆两端直接接地时，由护层电流引起的感应电动势为

$$\begin{cases} E'_A = I_{SB} jX_{AB} + I_{SC} jX_{CA} \\ E'_B = I_{SA} jX_{AB} + I_{SC} jX_{BC} \\ E'_C = I_{SA} jX_{AC} + I_{SB} jX_{BC} \end{cases} \quad (1)$$

式中，\$AB\$间距为\$S\$，\$BC\$间距为\$mS\$，\$CA\$间距为\$nS\$，则\$X_{AB} = 2\omega L l_n 2D_e/S\$，\$X_{BC} = 2\omega L l_n 2D_e/mS\$，\$X_{CA} = 2\omega L l_n 2D_e/nS\$。如图3所示。

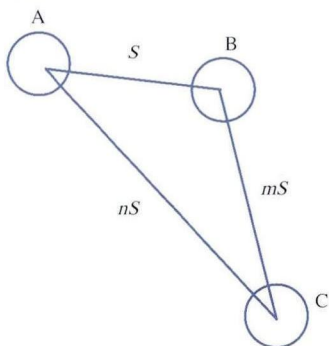


图3 任意排列的三相电缆

电动势\$E_A\$、\$E_B\$、\$E_C\$与电动势\$E'_A\$、\$E'_B\$、\$E'_C\$方向相反，其关系可以表示为

$$\begin{cases} I_{SA} Z_L + (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC})(R_1 + R_2 + R_E) + E'_A = E_A \\ I_{SB} Z_L + (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC})(R_1 + R_2 + R_E) + E'_B = E_B \\ I_{SC} Z_L + (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC})(R_1 + R_2 + R_E) + E'_C = E_C \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得

$$\begin{cases} I_{SA}(Z_L + R_1 + R_2 + R_E) + I_{SB}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{AB}) + I_{SC}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{CA}) = E_A \\ I_{SA}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{AB}) + I_{SB}(Z_L + R_1 + R_2 + R_E) + I_{SC}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{BC}) = E_B \\ I_{SA}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{AC}) + I_{SB}(R_1 + R_2 + R_E + jX_{BC}) + I_{SC}(Z_L + R_1 + R_2 + R_E) = E_C \end{cases} \quad (3)$$

取\$Z_{AA} = Z_L + R_1 + R_2 + R_E\$，\$Z_{AB} = R_1 + R_2 + R_E + jX_{AB}\$，\$Z_{AC} = R_1 + R_2 + R_E + jX_{CA}\$，\$Z_{BA} = R_1 + R_2 + R_E + jX_{AB}\$，\$Z_{BB} = Z_L + R_1 + R_2 + R_E\$，\$Z_{BC} = R_1 + R_2 + R_E + jX_{BC}\$，\$Z_{CB} = R_1 + R_2 + R_E + jX_{BC}\$，\$Z_{CC} = Z_L + R_1 + R_2 + R_E\$可得矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

两边乘以一个逆矩阵 \$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}^{-1}\$ 可得到

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

当电缆电流流过缆芯时，电缆电流在电缆周围产生交变的磁场，一部分磁力线与护层铰链，在电缆护层产生感应电压。电缆护层感应电压\$E_A\$、\$E_B\$、\$E_C\$的大小与电缆的长度和流过电缆的载流量成正比。

$$\begin{cases} E_A = 2\omega IL \times 10^{-7} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} l_n n + j \frac{1}{2} l_n \frac{nS^2}{d^2 GMR_s} \right] \\ E_B = 2\omega IL \times 10^{-7} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} l_n n \frac{mS}{d GMR_s} + j \frac{1}{2} l_n \frac{S}{md GMR_s} \right] \\ E_C = 2\omega IL \times 10^{-7} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} l_n n \frac{mS}{d GMR_s} + j \frac{1}{2} l_n \frac{n^2 S}{md GMR_s} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中，\$dGMR_s\$为金属护套的几何平均半径。

由式(5)、式(6)可知\$I_{SA}\$、\$I_{SB}\$、\$I_{SC}\$的大小随电缆长度与载流量的变化而变化。式(5)、式(6)及实测数据输入Matlab进行仿真计算，可得护层电流随电缆输出电流、电缆长度变化而变化的结果。

单芯电缆单端直接接地

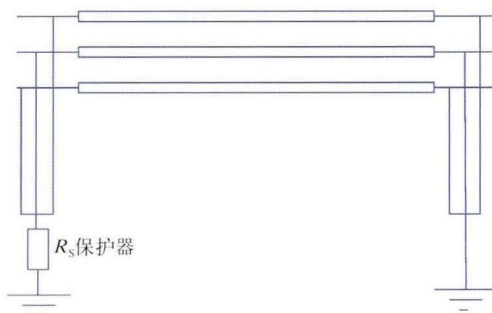


图4 单芯电缆一端直接接地，另一端经保护接地

单芯电缆单端直接接地时，因不能与大地构成回路，电缆护层中只有容性电流流过。

$$\begin{cases} I_{CA} = j\omega cLU_A \\ I_{CB} = j\omega cLU_B \\ I_{CC} = j\omega cLU_C \end{cases} \quad (7)$$

式中, I_{SA} 、 I_{SB} 、 I_{SC} 为A、B、C三相的电容电流;
 U_A 、 U_B 、 U_C 为A、B、C三相护套上的电缆电压;
 ω 为角频率; C 为单位长度电容。

现场数据测量与分析

台州供电公司恒芒1 673线为电缆线路,线路全长0.95 km,其中电缆分两段,一段0.41 km,二段0.54 km,电缆峰值负载电流为120 A左右,低谷时负载电流大约为50 A左右,电缆自2011年投运以来实测得到的电缆护层电流数据比较大,大约为电缆传输电流的80%,并且随着电缆输出电流的变化而变化,如图5所示。

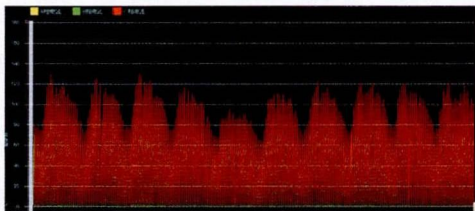


图5 实测护层电流变化曲线

经工作人员对电缆绝缘、护层间的接线进行检查,发现电缆护层接地方式为直接接地—经保护器

(上接第73页)

带电分、合接地开关,防止误入带电间隔。

主变压器低压侧开关柜操作闭锁逻辑

主变压器低压侧开关柜与分段开关柜类似。

主变压器低压侧开关柜与分段开关柜的操作闭锁逻辑区别在主变低压侧断路器手车推入工作位置前,主变压器高压侧接地开关也必须处于分位。主变压器高压侧地刀的分位闭锁低压侧开关、隔离手车的操作,能防止当低压侧母线由邻侧主变压器并列送电时,推入主变压器低压侧断路器手车造成母线被主变压器高压侧接地开关接地。通常做法可将主变压器高压侧接地开关的分位串入断路器合闸闭锁回路,也可将该信号接入升压站计算机监控系统然后通过一次设备防误操作中的电磁五防锁、微机五防功能来使断路器保持在分位来实现其对断路器手车的闭锁。

母线PT柜操作闭锁逻辑

与常规电网变电站不同,风电场升压站主变

接地—直接接地,但该电缆中间接头只采用一组保护接地,即电缆护层中间直接连接在一起。现在的连接方式相当于电缆两端直接接地。经工作人员讨论分析,将中间接头的一组保护接地变为两组直接保护接地,即两段电缆分别为一端直接接地,另一端经保护接地。护层电流变化情况如图6所示。

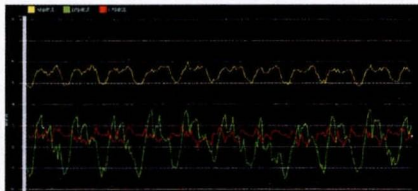


图6 电缆护层电流变化情况

结束语

对于在1 km内单芯电缆护层的连接方式进行探讨,当电缆护层两端直接接地时,护层电流值达到电缆输出电流的50%~95%,提高了电缆的运行温度,影响电缆输送容量和电缆的老化程度。当电缆两端直接接地,中间经保护接地不会产生环流,只有泄漏电流。因此对于在1 km范围内的大负荷单芯电缆,不能采用两端直接接地的方式。而采用护层中间直接接地两端经保护接地或护层两端直接接地中间经保护接地的方式。EA

(收稿日期: 2015.06.19)

(编辑: 刘群点)

压器高压侧和风机侧均为电源端。要操作PT柜接地手车,PT所在母线必须与电源隔离,包括将母线所连的所有开关柜断路器分位,拉出断路器手车、隔离手车等隔离方式,符合防止接地车造成母线接地原则。通常做法可将各开关柜断路器手车、隔离手车的试验位置串入PT柜合闸闭锁回路,同时将母线接地手车非工作位置用来闭锁断路器手车或隔离手车。

结束语

风电场开关柜应具有可靠的“五防”功能:防止误分、误合断路器;防止带负荷分、合隔离开关(插头);防止带电分、合接地开关;防止带接地刀闸送电;防止误入带电间隔。

一套合理的开关柜操作闭锁逻辑,应既能实现五防功能,又能方便现场值班人员运行、提高停送电效率。EA

(收稿日期: 2015.06.19)

(编辑: 刘群点)