

已建线路架空地线短路热稳容量校核计算

窦飞, 乔黎伟

(江苏省电力公司电网规划研究中心, 江苏南京 210024)

摘要: 基于对单相接地短路电流在架空地线中分布的计算模型分析, 给出了地线承受短路电流的工程计算简化方法; 归纳、分析了常用地线短路热稳容量计算方法, 给出了常用地线短路热稳容量值, 以此作为是否需要实施增容改造的评判依据; 并提出了地线短路热稳增容可采取的几种改造方案。

关键词: 输电线路; 地线; 短路电流; 热稳定; 计算

中图分类号: TM726

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2011)05-0020-04

江苏电网接线复杂, 且与华东电网主网紧密相联, 随着系统容量的不断增大, 当前江苏 220 kV 电网单相接地短路电流水平不断提升, 220 kV 枢纽站一般为 35~50 kA, 与其相邻的一、二级 220 kV 站为 20~40 kA, 其余普通 220 kV 站为 15~30 kA。江苏电网早期建设的 220 kV 输电线路, 架空地线多采用 GJ-50、GJ-70 等短路容量较小的地线, 虽然满足了当时电网规划建设的要求, 但随着系统容量的增大和线路 π 接、改接, 部分已建线路的地线已不能满足短路热稳要求, 此问题在近期江苏 220 kV 输变电工程的建设中较为突出。如架空地线的短路热稳容量不足, 当电网发生单相接地故障时, 将引起地线损伤断股, 断股修复需要停电, 如果股线松绞伸向带电的相线, 将造成单相或多相接地短路。因此已建线路架空地线热稳容量的校核, 应在电网规划设计阶段中予以足够重视, 以免给电网安全运行带来隐患。文中提出了单相接地短路电流分布以及地线短路热稳容量的工程计算简化方法; 并计算出已建线路常用地线的短路热稳容量, 作为地线是否需要开展短路热稳增容改造的评判依据; 并提出了地线短路热稳的增容改造方案。

1 短路电流在架空地线中的分布计算

1.1 计算模型

当输电线路发生单相接地故障时, 短路电流从故障点沿架空地线向两侧扩散; 从故障点往线路的方向看, 杆塔接地电阻和地线的阻抗形成了链形网络^[1]。在工程计算中, 一般采用图 1 所示的等值电路, 其中 R_{ti} 为杆塔接地电阻, Z_{gi} 为地线的阻抗。

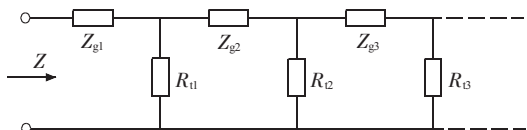


图 1 链形网络等效电路

假设图 1 链形网络无限长、杆塔之间的档距和接地电阻全部相等, 即 $R_{ti}=R_t, Z_{gi}=Z_g$, 则图 1 等效阻抗 Z 可用(1)式表达。

$$Z = (Z_g + \sqrt{Z_g^2 + 4Z_g R_t}) / 2 \quad (1)$$

输电线路的两端, 特别是进变电站的终端塔发生单相接地故障时, 进线档地线承受的短路电流分量最大, 因此将故障点选取在终端塔上进行分析。假设连接 L 站和 R 站的输电线路在 L 站的终端塔 k 处发生单相接地故障, 故障电流的分布如图 2 所示, 等值电路如图 3 所示。

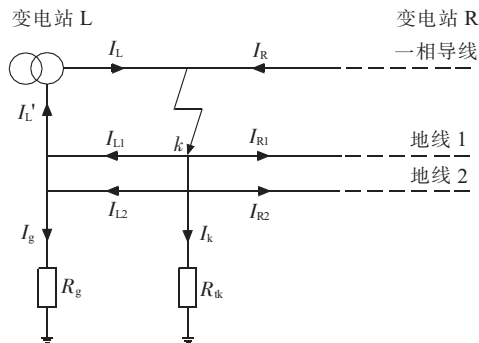


图 2 短路电流的分布

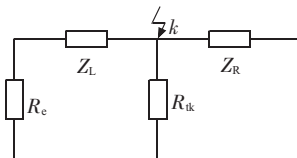


图 3 短路电流计算的等值电路

其中: I_L, I_R 为自 L, R 站的单相接地短路电流; I_{L1}, I_{L2} 为自地线 1, 2 返回故障点左侧的电流; I_{R1}, I_{R2} 为自地线 1, 2 返回故障点右侧的电流; I_L' 为经 L 站变压器中性点返回故障点的短路电流; I_k, I_g 为经杆塔接地体和 L 站接地网的入地电流; R_{tk} 为终端塔 k 接地电阻; Z_L 为终端塔和变电站间的进线档架空地线阻抗; Z_R 为短路点右侧链形网络等效阻抗, 按式(1)计算; R_g 为 L 站的接地电阻; R_e 为 L 站的等效接地电阻, $R_e = \beta \times R_g$ ($0 < \beta < 1$), 工程计算中取 $\beta = 0$ 。

短路电流自 k 点注入后,大部分经 L 站变压器中性点返回故障点,只有少部分返回 R 站或经 L 站接地网和终端杆塔 k 的接地体入地。 $(I_{L1}+I_{L2})$ 与 (I_L+I_R) 的比值,即注入的短路电流由进线档地线承担的比例,主要由线路长度决定,文献[2]曾以典型参数对不同长度的输电线路进行计算,线路路径长度 25 km 时约为 70%,线路路径长度 189 km 为 87%。对于 220 kV 的工程计算,可以偏保守采取 90% 进行校核。

1.2 2 根地线中的短路电流分布

两根地线中短路电流分配的等值电路如图 4 所示,其各自分配到的短路电流按式(2)计算^[3]。

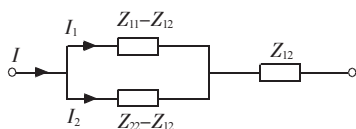


图 4 短路电流在 2 根地线中的分布等效电路

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{22} - Z_{12}}{Z_{11} - Z_{12}} \quad (2)$$

式中: I 为 2 根地线承受的总短路电流,A; I_1, I_2 为地线 1,2 承受的短路电流,A; Z_{11}, Z_{22} 为地线 1,2 的自阻抗, Ω/km ; Z_{12} 为地线 1 和 2 之间的互阻抗, Ω/km ,工程计算中,一般不考虑导线和地线间的互感,仅考虑 2 根地线间的互感。

地线的自阻抗和互阻抗分别按式(3)和式(4)进行计算^[4]。

$$Z_{ii} = R + 0.05 + j0.145 \times \lg(D_e / r_c) \quad (3)$$

$$Z_{ij} = 0.05 + j0.145 \times \lg(D_e / D_{ij}) \quad (4)$$

式中: Z_{ii} 为地线的自阻抗, Ω/km ; Z_{ij} 为地线的互阻抗, Ω/km ; R 为地线的直流电阻, Ω/km ; D_e 为地中电流等效深度,m; r_c 为地线的有效半径,m; D_{ij} 为地线 i, j 之间距离,m。

2 架空地线短路热稳容量计算

2.1 截面校验公式

(1) 钢绞线和钢芯铝绞线的简化计算。由 DL/T 621—1997、DL/T 5222—2005 提出的接地线截面校验公式,推导出地线热稳容量表达式(5)^[5,6],钢绞线和钢芯铝绞线可采用该式计算。

$$Q \leq (S \times C)^2 \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: Q 为地线的短路热稳容量, $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$; S 为载流部的截面, mm^2 ; C 为热稳定系数,可自上述两标准直接查取:工作温度 40℃、短路允许温度 400℃^[7]时,钢的热稳定系数 $C=70$;工作温度 40℃、短路允许温度 200℃^[7]时,铝的热稳定系数 $C=99$ 。

钢绞线采用单一金属材料绞合而成,故其全部钢截面均可视作载流部。当地线由不同金属绞线绞合而成,由于金属绞线之间接触不紧密,短路电流的持续时间很短,因此电流在外层金属线中产生的热量,来不及扩散到内层不同金属材质的单线中,因此一般只考虑将外层同材质的金属作为载流部。钢芯铝绞线短路容量计算时,不考虑钢芯的热容量,仅以铝作为载流部。据此计算出常用型号地线短路热稳容量,如表 1 所示。

表 1 钢绞线和钢芯铝绞线短路热稳容量

地线型号	短路热稳容量 / ($\text{kA}^2 \cdot \text{s}$)
GJ-50	12.3
GJ-70	24.0
GJ-80	31.4
GJ-100	49.0
LGJ-70/40	48.0
LGJ-95/55	88.5

(2) 铝包钢绞线和铝包钢芯铝绞线。铝包钢单线是在钢的表面均匀包覆一定厚度的铝,通过连续强制拉拔形成的高效双金属材料,具有电流集肤效应较小、铝钢接触紧密的特点。铝包钢绞线全部由铝包钢单线绞合而成,热稳容量计算时,可将其视作单一材质地线,即短路过程中铝、钢等温,并计入钢的热容量。铝包钢芯铝绞线,外层铝单线的结构同于钢芯铝绞线;其内层为铝包钢单线,热稳计算时,不考虑钢的热稳容量,但需计入表面铝的热容量。

前述两型地线短路热稳容量采用式(6)计算^[7]。

$$Q = \frac{C}{\alpha_0 \times R_0} \times \ln \frac{\alpha_0 \times (t_2 - 20) + 1}{\alpha_0 \times (t_1 - 20) + 1} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中: Q 为地线的短路热稳容量, $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$; C 为绞线的热容量, $\text{J}/(\text{C} \cdot \text{km})$; α_0 为绞线 20℃时的电阻温度系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; R_0 为绞线 20℃时的电阻, Ω/km ; t_1 为地线初始温度, $^\circ\text{C}$,一般取 40℃; t_2 为地线短路热稳定允许温度, $^\circ\text{C}$,铝包钢绞线的短路最高允许温度取 300℃,铝包钢芯铝绞线取 200℃。

整根绞线的综合热容量 C 按式(7)计算。

$$C = \sum_{i=1}^n M_i \times C_i \times S_i \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中: M_i 为材料 i 的单位质量, g/cm^3 ,铝取 2.7,钢取 7.8; C_i 为材料 i 的热容量, $\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$,铝取 0.888,钢取 0.46; S_i 为材料 i 的截面, mm^2 。据此计算出常用型号地线短路热稳容量如表 2 所示。

2.2 短路电流的持续时间

架空地线的短路容量确定后,其最大允许短路电流按式(8)计算。

表2 铝包钢绞线和铝包钢芯铝绞线
短路热稳容量参考值

地线型号	短路热稳容量 / (kA ² ·s)
JLB35-70	51.5
JLB40-70	56.0
JLB40-120	161.5
JLB40-150	241.0
JLB20A-80	42.2
JL/LB20A-70/40	67.1
JL/LB20A-95/55	128.5

$$Q=I_{\max}^2 \times t \quad (8)$$

式中： Q 为地线的短路热稳容量， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ； t 为短路电流持续时间， s ； I_{\max} 为与短路电流持续时间相对应的最大允许短路电流， kA 。 t 主要由继电保护及断路器动作时间决定^[8,9]。

当前 220 kV 线路工程计算主要有 0.12 s、0.15 s、0.20 s、0.25 s 等 4 种取值。0.12 s：主保护动作及断路器单相开断时间一般在 0.12 s 以内，该值用于极端情况下的验算；0.15 s：在前述 0.12 s 基础上考虑一定裕度，用作普通地线验算；0.20 s：已建线路的普通地线更换为复合光缆地线 (OPGW) 时，再考虑一定裕度所采取的验算时间；0.25 s：考虑主保护动作 - 短路切除 - 重合闸 - 重合闸不成功 (故障未消除) - 主保护再次动作等步骤，由保护动作时间、通道时间、断路器动作时间、重合闸及保护再次动作时间、短路电流非周期分量等组成的持续等效时间，其值约为 0.25 s，近期新建工程一般取用，该值验算。

普通地线和 OPGW 的短路电流持续时间应区别对待，OPGW 除用作普通地线外，还用于系统通信，故须保证内部纤芯的温升在容许范围内，以防光纤过快老化或过热损坏；而普通地线，仅需避免机械强度的明显下降及不可回复的塑性变形，这种情况往往是在长期的效应积累后才可能发生，所以瞬间的高温不会对分流地线造成大的影响。

根据以上分析，建议已建线路架空地线热稳容量校核时短路电流的持续时间，普通地线取 0.15 s、OPGW 取 0.20 s。

3 地线热稳增容改造方案

3.1 某实际 220 kV 工程举例

江苏电网 2011 年 220 kV H 输变电工程，需将已建的 220 kV J 变电站至 D 变电站的单回线路 (以下简称 J-D 线) 接入新建的 H 变电站。J-D 线建设年代较早，两根地线均为 GJ-50 型钢绞线；H 变电站投运后的电网网架结构和系统容量，较 J-D 线当初设计时所考虑的边界条件发生了较大变化，H 站、

D 站短路电流接近 30 kA，J 站短路电流接近 50 kA，GJ-50 地线已明显不能满足短路热稳要求，必须采取一定的增容措施。

3.2 可采取的措施

3.2.1 更换地线

地线短路热稳增容，最有效的方法是将其更换为较高热稳容量的良导体地线，如将钢绞线更换为铝包钢绞线或结合通信网的规划，更换为 OPGW。地线更换时，需注意铁塔及基础强度校验、档距中央导线电气距离校验 (特别是大档距)。铁塔和基础的强度校验，仍沿用已建线路的原设计标准，如不满足强度要求，原则上不更换铁塔主材，仅更换地线支架和部分塔身斜材。根据工程经验，对于水泥杆，由于服役期较长、杆体状况差等原因，往往不具备单独更换地线支架和塔身斜材的条件，只能整体改造为角钢塔。需要指出的是，前述更换地线支架和塔身斜材的方案，由于铁塔受力后的形变以及铁塔施工图与放样图的差异，其工程实施相对较为困难，不宜大范围应用。

3.2.2 降低杆塔接地电阻

降低杆塔的接地电阻可以增加短路电流的入地分量，从而减少流经架空地线的短路电流。江苏省 220 kV 杆塔的接地电阻一般按不高于 5~10 Ω 设计；根据工程经验，采取一定措施后可以将接地电阻控制在 3 Ω ，但需采用特殊接地装置，且对场地布置要求高，很难实现。因此如已建线路架空地线的短路容量偏紧，可对变电站进出口段的数基杆塔进行接地装置改造，将杆塔的接地电阻控制在 3 Ω 以内。

此外，由于变电站的接地电阻一般要求在 0.5 Ω 以内，因此对于承受最大短路电流的终端塔，可将其接地体与变电站的接地网相连，以降低杆塔接地电阻，增加短路电流的入地分流。

3.2.3 保证地线与塔身的可靠连接

地线引流线可保证地线与杆塔的可靠连接，普通地线设计时，一般仅通过金具与塔身相连，其可靠性不高；如已建线路架空地线的短路容量偏紧，可考虑在塔身上增加接地孔，加装地线接地引流线。

3.2.4 采用地下分流线

在线路比较平坦的地区，如具备场地条件，可通过敷设接地带，将变电站出口段 1~2 km 范围内的杆塔接地装置联结起来，其作用原理相当于架设了第三根地线，当杆塔发生导线单相接地故障时，可对地线起分流作用，同时又可作为杆塔的接地装置。

3.2.5 多回路地线并联

将变电站出口不同出线回路的数个终端塔接地体连接起来，则短路电流可沿多个出线回路的地线

流进变电站,这样回路电流可大幅减小。但如连接的终端塔过多,则须注意过流零序保护问题^[10]。

4 结束语

短路电流在架空地线和杆塔接地体间的分布,如精确计算,需求解由线路各档构成的大规模网络,计算烦琐。本文提出的工程计算方法,简化了计算过程,满足工程计算精度要求。计算出的已建线路常用架空地线的热稳容量值,可以作为地线是否需要开展短路热稳增容改造的评判依据。已建线路架空地线不满足热稳容量要求时,可采用更换地线、降低杆塔接地电阻、保证地线与塔身的可靠连接、建设地下分流线、多回路地线并联等措施。

参考文献:

[1] 赵胜利.对避雷线热稳定校验的探讨[J]. 电力建设,1996,17(4):22-25.
 [2] 袁建生,马信山,邹 军,等.关于 OPGW 设计选型中的最大短路电流计算[J]. 电力建设,2001,22(10):51-54.

[3] 杜天苍,张 尧,夏文波.利用短路电力热效应的 OPGW 分流地线选型[J]. 高电压技术,2007,33(9):110-114,119.
 [4] 刑树清.3 根架空地线的等值电路及分流计算[J]. 电力建设,1996,17(3):33-36.
 [5] DL/T 621—1997,交流电气装置的接地[S].
 [6] DL/T 5222—2005,导体和电器选择设计技术规定[S].
 [7] DL/T 5092—1999,110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
 [8] 赵全江,孟恒信.500 kV 线路地线热稳定校验时的故障时间的取值问题[J]. 电力建设,2004,25(1):20-21.
 [9] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册(第一册)[M].北京:中国电力出版社,1989.
 [10] 臧剑欣.光纤复合架空地线(OPGW)热稳定计算分析[J]. 电力系统通信,2004,25(5):12-14,42.

作者简介:

窦 飞(1979-),男,江苏江都人,工程师,从事线路工程设计研究、电网规划及项目前期工作;
 乔黎伟(1973-),男,江苏泰州人,高级工程师,从事线路工程设计研究、电网规划及项目前期工作。

Verification and Calculation on Short-circuit Thermal Stability Capacity of Ground Wire in Existing

DOU Fei, QIAO Li-wei

(Grid Planning and Research Center of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the analysis about calculation model of the single-phase short-circuit current distribution among the ground wires, the simplified engineering calculation method of the distributed current was presented in the paper. And the calculation method about short-circuit thermal stability capacity of ground wire were analyzed. The short-circuit thermal stability capacity value of the common ground wires in common use was also given, which can be used to judge whether need to upgrade or not in the end. At last, some reconstruction schemes on short-circuit thermal stability capacity upgrading were proposed.

Key words: transmission line; ground wire; short-circuit current; thermal stability; calculation

(上接第 19 页)

作者简介:

任立平(1985-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,电网稳定运行研究工作;
 董兴绿(1979-),男,江苏南京人,助理工程师,从事电力系统继

电保护工作;

于跃海(1972-),男,江苏泰州人,研究员,从事电力系统动模与数字仿真工作;
 胡 云(1983-),男,广西马山人,助理工程师,从事电力系统动模与数字仿真工作。

Solar Cell Modeling and Maximum Power Point Tracking Control Based on RTDS

REN Li-ping¹, DONG Xing-lü², YU Yue-hai¹, HU Yun¹

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co.Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, the solar cell is modeled in the software of RTDS (real time digital simulation) and simulations were carried on to test its IV and PV characteristics. Referring to the duty cycle perturbation and observation method, the PI regulator was applied to adjust the error signal of the solar cell voltage and control the phase modeling signal of the inverter. Then, the maximum power point tracking could be achieved by SPWM duty cycle, making the solar cell work in the vicinity of the maximum power point as much as possible to improve the efficiency of solar energy utilization.

Key words: solar cell; RTDS; maximum power point