

河南油田35 kV配电线路防雷研究及应用

针对河南油田35 kV配电线路雷击跳闸情况进行雷击过电压的分析、研究,认为雷击跳闸的主要原因为感应雷过电压。由35 kV配电线路全线架设避雷线及线路分散安装避雷器的雷击过电压仿真计算结果可知,采取在线路分散安装避雷器的措施可有效降低感应雷跳闸率,实施后效果显著。

姜俊莉 王勇焕 贺 璞/河南油田水电厂



姜俊莉/高级工程师

0 引言

目前国内油田电网配电线路一般为6/10 kV电压等级,为提高电网供电半径,降低线路电能损耗,河南油田井楼、古城和王集油区14条油井配电线路采取35 kV电压供电。35 kV油井配电线路直线杆杆型为三角形结构、铁横担,采用SC-280及SC-280Z型瓷横担绝缘子。35 kV配电线路仅在配电变压器上安装有避雷器,线路无避雷线、避雷器等防护设施。河南油田位于河南省西南部的南阳盆地,雷暴日为29~50日/年,属多雷区。雷雨天气跳闸率高,每年雷击跳闸占35 kV配电线路跳闸总次数的30%以上,影响了线路运行可靠性。

1 35 kV配电线路雷击过电压研究

关键词/Keywords

直击雷·
感应雷·
雷击跳闸·
建弧率·
分散安装·
避雷器·

35 kV及以下电网中性点一般采用不接地或谐振接地的方式,因此,线路在雷击发生单相对地闪络时,建弧率很低,一般不会引起线路跳闸;仅在两相或三相绝缘闪络时才可能引起线路跳闸。

架空线路雷击跳闸起因可能是雷电直击架空线路,也可能是靠近线路雷击地面或其他物体,在架空线路导线上产生感应雷过电压引起绝缘闪络。因

此,架空线路雷击跳闸次数 n 是由以下两部分组成,即

$$n = n_{jx} + n_{jd} \quad (1)$$

式中, n_{jx} 为雷电直击架空线路跳闸次数; n_{jd} 为靠近架空线路雷击地面或其他物体,在架空线路导线上产生感应雷过电压发生绝缘闪络引起线路跳闸次数。

1.1 直击雷雷击跳闸率计算

(1) 雷击杆塔时的雷击跳闸率

无避雷线线路雷击杆塔时的雷击跳闸率 n_1 计算公式为

$$n_1 = gN_L\eta P_{11} \quad (2)$$

式中, g 为雷电击杆率; N_L 为线路每百公里、每40个雷电日雷击总数; η 为建弧率; P_{11} 为超过耐雷水平 I 的概率。

已知一般线路每百公里、每40个雷电日雷击总数为

$$N_L = 0.28(b+4h) \quad (3)$$

式中, b 为避雷线间水平宽度,无避雷线时取0; h 为避雷线平均高度,无避雷线时取最高相导线高度。

根据

$$I = \frac{U_{50\%}}{\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6}\right)(1-k)} \quad (4)$$

可反求出耐雷水平 I 及超过耐雷水平 I 的概率 $P_{11}(\%)$,其中

$$\lg P_{11} = -\frac{I}{88} \quad (5)$$

线路闪络后,不一定能转变为稳定的工频电弧而引起跳闸。能否建弧,主要和弧道的平均电场强度 E 有关。在一般情况下,建弧率可近似计算

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (6)$$

式中, E 为弧道的平均电场强度。

E 的计算公式为

$$E = \frac{U_1}{2l_j + l_m} \quad (7)$$

式中, U_1 为线路额定线电压; l_j 为绝缘子串闪络距离; l_m 为横担的线间距离, 对铁横担取为0。

河南油田35 kV配电线路一般采用LGJ-70导线, 线路弧垂为0.248 m, 线路绝缘子三相均采用SC-280瓷横担绝缘子, 中相和某边相闪络。

导线的平均高度 h_d 可如下计算

$$h_d = h - \frac{2}{3}f_d \quad (8)$$

式中, h 为导线的高度, 中相取10 m、边相取9.2 m; f_d 为弧垂, 弧垂的大小与导线截面积、导线承受的拉力和档距的大小有关。

由式(8)得出中相导线的平均高度为: $h_d = [10 - (2/3) \times 0.248] \text{ m} = 9.835 \text{ m}$; 边相导线的平均高度为: $h_d = [9.2 - (2/3) \times 0.248] \text{ m} = 9.035 \text{ m}$ 。

则由式(3), 可求出雷击总数为: $N_L = 0.28(b + 4h) = 0.28(0 + 4 \times 9.835) = 11.015 2$ 。

水泥杆塔电感取0.42 $\mu\text{H}/\text{m}$, 绝缘子正极性50%冲击闪络为280 kV, 冲击电阻 R_{ch} 取15 Ω 。

中相和任一边相导线的耦合系数 k 取0.301 5。

根据以上条件及式(4)可求出此时耐雷水平

$$\text{为 } I = \frac{280}{\left(15 + \frac{0.42 \times 20}{2.6} + \frac{9.035}{2.6}\right)(1 - 0.3015)} \text{ kA} \approx 19.952 8 \text{ kA},$$

从而可求出 $P_n = 59.33\%$ 。

已知SC-280的长度为0.67 m, 则由式(6)可得: $E = 35 \text{ kV}/(0.67 \text{ m} + 0.67 \text{ m}) = 26.119 4 \text{ (kV/m)}$, 则建弧率 $\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} = 0.379 9$ 。平原地区, 无避雷线线路击杆率 $g = 0.5$ 。

由式(2), 35 kV线路雷击杆塔时的雷击跳闸率为: $n_1 = gN_L\eta P_n = (0.5 \times 11.015 2 \times 0.379 9 \times 0.593 3) \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年}) = 1.241 4 \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年})$ 。

(2) 雷击导线时的雷击跳闸率

无避雷线线路雷击导线时的雷击跳闸率 n_2 计算公式为

$$n_2 = (1 - g)N_L\eta P_{n2} \quad (9)$$

雷击杆塔时的耐雷水平 I 为

$$I = \frac{U_{50\%}}{100} \quad (10)$$

根据式(10)可反求出耐雷水平 I 及超过耐雷水平 I 的概率 $P_n(\%)$, 其中

$$\lg P_{n2} = -\frac{I}{88} \quad (11)$$

对于河南油田无避雷线的35 kV线路, 至少两相闪络才会导致跳闸, 因此其遭受雷直击导线时的耐雷水平 $I = [(280 + 280)/100] \text{ kA} = 5.6 \text{ kA}$, 则 $P_{n2} = 86.37\%$ 。

35 kV线路雷击导线时的雷击跳闸率为

$$n_2 = (1 - g)N_L\eta P_{n2} = [(1 - 0.5) \times 11.015 2 \times 0.379 9 \times 0.863 7] \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年}) = 1.807 2 \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年}) \quad (12)$$

(3) 直击雷雷击跳闸率的综合计算

架空线路直击雷雷击跳闸率是雷击杆塔跳闸率与雷击导线跳闸率之和, 则可计算得出35 kV线路直击雷雷击跳闸率: $n = n_1 + n_2 = (1.241 4 + 1.807 2) \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年}) = 3.048 6 \text{ 次}/(\text{百公里} \cdot \text{年})$ 。

1.2 感应雷雷击跳闸率计算

已知导线高度, 在距离 S ($> 65 \text{ m}$) 一定的情况下, 引起线路闪络的雷电流必须满足

$$I \geq \frac{U_m}{25h} S \quad (13)$$

由于线路两侧的 $2h$ 宽的落雷均被认为是直击雷, 每平方公里每雷暴日的地面落雷次数即地面落雷密度为 γ , 取0.07。则感应雷引起的雷击跳闸率为

$$n = 2 \times \int_{2h}^{\infty} P \frac{40\gamma \times 100}{1000} dS \quad (14)$$

35 kV配电线路的闪络电压为280 kV, 即只要施感电压幅值 U_m 超过280 kV, 线路就会放电, 引起故障。

由式(13), 求出 $I \geq (U_m/25h)S = [280 \text{ kV}/(25 \times 9.835 \text{ m})] \times 65 \text{ m} = 74 \text{ kA}$

由式(11), 求出 $P = 14.42\%$

依据式(14)求出雷击跳闸率： $n=10.458\ 4$ 次/(百公里·年)。

由上述计算可知，35 kV配电线路在雷击跳闸率为： $n=(3.048\ 6+10.458\ 4)$ 次/(百公里·年)=13.507次/(百公里·年)

因此，35 kV配电线路在雷击跳闸故障中，直击雷跳闸率所占比例为： $(3.048\ 6/13.507)\times 100\%=22.5\%$ ；感应雷跳闸率所占比例为： $(10.458\ 4/13.507)\times 100\%=77.5\%$ 。

1.3 35 kV配电线路雷击过电压分析

由以上雷击跳闸计算结果可知，对于35 kV配电线路来说，直击雷、感应雷过电压导致的故障所占比例分别为22.5%、77.5%。由此可见，直击雷不是造成线路雷击跳闸的主要原因，感应雷才是造成线路雷击跳闸的主要原因。河南油田电网35 kV油井配电线路直线杆头为三角形结构、铁横担，采用污秽等级为I级的SC-280及SC-280Z型瓷横担绝缘子。35 kV配电线路三相50%雷电冲击闪络电压均为280 kV，即感应雷过电压的幅值远大于线路的临界闪络电压，容易发生绝缘子闪络，由于感应过电压同时存在于三相导线，相间不存在电位差，故只能引起对地（横担）闪络。

当线路落雷且雷电流超过线路的耐雷水平时，绝缘子周围空气电离，引起线路绝缘对地（杆塔/横担）闪络击穿，造成短路；因雷电流冲击闪络时间很短（几十微秒），变电站开关来不及动作（变电站保护最快动作时间40 ms左右），故雷电流不会造成线路跳闸。在雷电消失后，冲击闪络转变为工频续流，当空气间隙的电气强度恢复速度小于恢复电压的上升速度时，工频电流

过零时电弧不能熄灭。因两边相绝缘子与铁横担的空气间距较小，故易通过铁横担形成相间短路，造成线路跳闸。由此可见，35 kV及以下配电线路雷击跳闸率高的主要原因是由于配电线路雷击后相间不能熄弧、建弧率过高造成的，因此35 kV及以下配电线路减少雷击跳闸的关键是降低建弧率。

2 35 kV配电线路雷击过电压仿真计算

2.1 仿真软件

采用ATP-EMTP程序进行配电网系统的直击雷过电压的仿真计算，根据电力设备等值参数的不同特性，建立相应的代数方程、常微分方程和偏微分方程，形成节点导纳矩阵。采用优化节点编号技术和稀疏矩阵算法，以节点电压为未知量，利用矩阵三角求解，最后求得各支路的电流、电压和所消耗的功率、能量。以古城开关站35 kV东干线为例建模，进行仿真及雷击跳闸率计算结果如下。

2.2 雷击杆塔耐雷水平仿真计算

直线杆耐雷水平及雷击跳闸率仿真计算结果如表1所示。

表1 直线杆耐雷水平及雷击跳闸率仿真计算结果

单相闪络耐雷水平/kA	双相闪络耐雷水平/kA	建弧率	直击雷跳闸率/[次/(百公里·年)]	感应雷跳闸率/[次/(百公里·年)]
16.44	28.39	0.379 9	3.048 6	10.458 4

2.3 全线装设避雷线仿真计算

线路全线加装避雷线，雷击跳闸率仿真计算结果如表2所示。

表2 直线杆耐雷水平仿真及雷击跳闸率计算结果

雷击于避雷线		雷击于边相导线		建弧率	直击雷跳闸率/[次/(百公里·年)]	感应雷跳闸率/[次/(百公里·年)]
单相闪络耐雷水平/kA	双相闪络耐雷水平/kA	单相闪络耐雷水平/kA	双相闪络耐雷水平/kA			
27.52	43.40	0.978	35.85	0.379 9	0.143 9	10.458 4

由表1、表2可以看出，35 kV配电线路加装避雷线后，建弧率及感应雷跳闸率均不变，直击雷

跳闸率由原来的3.048 6次/(百公里·年)降为0.143 9次/(百公里·年)，降低95%，即全线加装避雷线的

措施可有效减少直击雷引起的线路跳闸次数。

由此可见，35 kV配电线路全线装设避雷线后，建弧率及感应雷跳闸率均未发生变化，直击雷跳闸率下降较多（95%以上），具有较好的直击雷防治效果；但对于35 kV配电线路来说，直击雷过电压导致的故障所占比例仅为22.5%，直击雷不是造成线路雷击跳闸的主要原因，故全线装设避雷线的措施对降低线路雷击综合跳闸率效果不够显著。

2.4 线路分散安装避雷器的仿真计算

河南油田35 kV配电线路绝缘子闪络电压约为280 kV，远低于感应雷过电压可以达到的幅值，易受到感应雷过电压的威胁。35 kV线路末端装MOA后不同导线长度引发闪络的施感电压值如图1所示。

当线路不采取任何措施，即末端空载时，施感电压峰值大于280 kV即发生闪络故障。取35 kV线路平均高度 $h=15\text{ m}$ ，由于线路两侧的 $2h$ 宽的落雷均被认为是直击雷，这样当导线高度 $h=15\text{ m}$ 时， S 的最小值为30 m。

由式（13）可得最小闪络电流 $I_{\min}$ 为

$$I_{\min} = \alpha_m S \tag{15}$$

此时有： $\alpha_m = U_m / (25h) = 280 / (25h) = 0.747$ 。

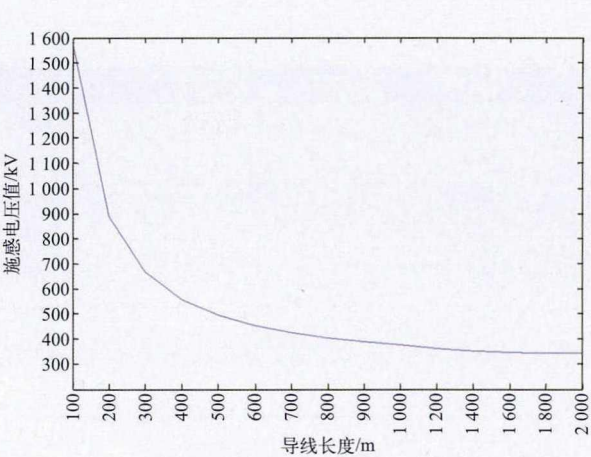


图1 35 kV配电线路不同导线长度引发闪络的施感电压值

将式（15）代入式（11），有

$$P = 10^{\frac{\alpha_m S}{88}} = \exp\left(-\frac{\alpha_m \ln 10}{88} S\right) \tag{16}$$

假定落雷次数沿 S 均匀分布时，落雷引起闪络的次数与 P 的积分成正比。

闪络系数计算公式为

$$P_i = \int_{S>30} P dS = \int_{30}^{\infty} P dS = \frac{38.218}{\alpha_m} 10^{\frac{30}{88} \alpha_m} \tag{17}$$

末端开路时的闪络系数为： $P_0 = P_i(0.747) = 28.464$ 。

在35 kV线路不同位置安装避雷器后的闪络降低百分数及闪络系数分别如表3、图2所示。

表3 35 kV线路安装MOA后的闪络系数

线路长度 l/m	最小施感电压 U_m/kV	$\alpha_m = U_m/25h$	闪络系数	闪络次数降低百分数(%)
末端开路	280	0.747	$P_0 = P_i(0.747) = 28.464$	—
100	1 568.6	4.182	$P_{0.5} = P_i(4.182) = 0.343$	98.8
150	1 111.8	2.965	$P_{0.75} = P_i(2.965) = 1.257\ 3$	95.6
200	887.4	2.3664	$P_1 = P_i(2.366\ 4) = 2.520\ 3$	91.1
250	754.5	2.012	$P_{1.25} = P_i(2.012) = 3.915$	86.2
300	666.2	1.778	$P_{1.5} = P_i(1.778) = 5.325$	81.3
350	603.8	1.61	$P_{1.75} = P_i(1.61) = 6.707$	76.4
400	557.5	1.487	$P_2 = P_i(1.487) = 7.998$	71.9
450	522	1.392	$P_{2.25} = P_i(1.392) = 9.206$	67.7
500	494	1.317	$P_{2.5} = P_i(1.317) = 10.321$	63.7
550	471.3	1.257	$P_{2.75} = P_i(1.257) = 11.334\ 7$	60.2
600	452.7	1.207	$P_3 = P_i(1.207) = 12.273$	57.2
650	429.6	1.1456	$P_{3.25} = P_i(1.146) = 13.564$	52.3
700	424.3	1.131	$P_{3.5} = P_i(1.131) = 13.907$	51.1
750	413.3	1.102	$P_{3.75} = P_i(1.102) = 14.602$	48.7
800	403.9	1.077	$P_4 = P_i(1.077) = 15.237$	46.5

(续)

线路长度/m	最小施感电压 U_m /kV	$\alpha_m = U_m/25h$	闪络系数	闪络次数降低百分数(%)
900	388.7	1.037	$P_{4.5} = P_i(1.037) = 16.329$	42.6
1 000	377.1	1.006	$P_5 = P_i(1.006) = 17.247$	39.4
1 200	361.4	0.964	$P_6 = P_i(0.964) = 18.602$	34.6
1 400	351.8	0.938	$P_7 = P_i(0.938) = 19.512$	31.5
1 600	346.1	0.923	$P_8 = P_i(0.923) = 20.064$	29.5
1 800	342.7	0.914	$P_9 = P_i(0.914) = 20.405$	28.3
2 000	340.8	0.909	$P_{10} = P_i(0.909) = 20.598$	27.6

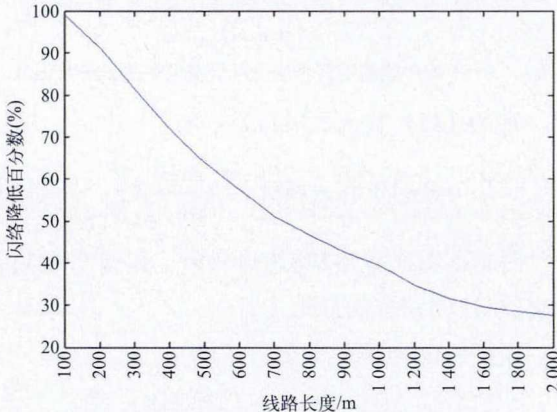


图2 35 kV线路安装MOA后的闪络降低百分数

由表3、图2可以看出，随着线路避雷器安装密度的增加，35 kV配电线路感应雷过电压闪络的次数随之降低。

若采取每隔600 m安装一组避雷器的措施，安装避雷器后，感应雷跳闸率可降低57.2%，雷击综合跳闸率降低44.3%（注：35 kV配电线路感应雷跳闸率为77.5%， $57.2\% \times 77.5\% = 44.3\%$ ），即可取得较好的防雷效果。

现场实施时，可依据35 kV配电线路的长度及其重要性，选择合理的安装间隔。

3 现场应用及效果

2010~2012年河南油田分别对井楼、古城和王集油区14条35 kV配电线路实施了防雷技术改造，即在线路上每隔600 m安装一组带串联间隙的

氧化锌避雷器。实施后，有效提高了35 kV配电线路雷击过电压防护水平，线路雷击跳闸次数大幅度下降。2010~2012年雷击跳闸分别为40次、35次和36次，2013、2014、2015和2016年雷击跳闸分别降为20次、19次、8次和12次，年雷击平均跳闸次数减少60.1%，提高了油井线路运行可靠性。

4 结束语

35 kV及以下配电线路雷击跳闸率高的主要原因是由于配电线路雷击后相间不能熄弧、建弧率过高造成的，因此减少雷击跳闸的关键是降低建弧率。在35 kV配电线路雷击跳闸故障中，直击雷、感应雷过电压造成的跳闸所占比例分别为22.5%、77.5%，故感应雷是造成线路雷击跳闸的主要原因，因此在35 kV配电线路采取分散安装避雷器的措施，可有效降低感应雷跳闸率。现场运行经验表明，应用效果显著，该措施可在同类电网推广应用。

参考文献

[1] 文远方. 高电压技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
[2] 方瑜. 配电网过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

(收稿日期: 2017-05-12) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告