500 kV电缆隧道内敷设的研究

通过分析比较隧道内500 kV电缆品字形和三相平行布置方式、水平蛇形和垂直蛇形的敷设形式，回流线及电缆预留段的设置等，为火电厂合理选择500 kV电缆敷设方式和参数提供参考。

卢永魁　邬　楠　许卫东　于　青　朱月涌／山东电力工程咨询院有限公司

卢永魁／工程师

0　引言

近年来，随着经济的发展和技术的进步，500 kV超高压电缆不再是国外少数几个电缆厂家所垄断，国内厂家依靠可靠的产品、合理的价格和优质的服务逐渐提升产品占有率，进一步推动了国内超高压电缆行业的发展。性价比的提高使得原来只在水电站和电网公司中使用的500 kV电缆[1-5]如今在火电厂中的应用也逐渐增多。XY火力发电厂机组容量为660 MW，主变压器至升压站之间采用国产单芯800 mm^{2}截面积的500 kV交联聚乙烯电缆连接，单根长度达900 m，布置在隧道内。本文将以XY电厂500 kV电缆为例，对上述问题进行讨论和研究。

1　隧道内电缆的布置方式

根据本工程特点，500 kV电缆在隧道内的布置方式主要有两种基本形式[6-9]：①紧凑品字形布置方式，如图1所示；②三相平行布置，即三相垂直布置与三相水平布置，分别如图2、图3所示（由于电压等级高，不考虑控制电缆与高压电缆在同一侧布置的方式）。三种布置方式的特点比较如表1所示。

由表1可知，在满足额定电流的前提下，三相平行布置方式的载流量更高；紧凑品字形布置方式中感应电压小于50 V，满足规程要求，三相平行布置方式中感应电压在50～300 V之间时，电缆需采取安全措施以防止人员任意接触金属层；

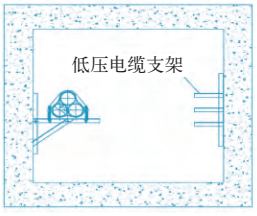

图1　电缆紧凑品字形布置

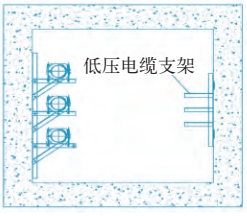

图2　电缆三相垂直布置

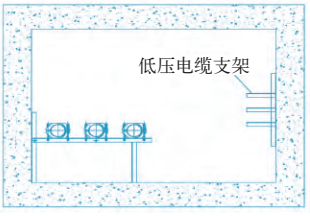

图3　电缆三相水平布置

表1　布置方式特点比较

项目 \ 布置方式	紧凑品字形布置	三相垂直布置	三相水平布置
电缆载流量/A	1 075	1 190	1 190
载流量为额定电流的倍数	1.15	1.27	1.27
电缆正常运行时的感应电压/V	45	A、C相119 B相96	A、C相119 B相96
电缆敷设时隧道净空最小尺寸：宽×高/（m×m）	2×1.9	1.8×1.9	2.55×1.9
电缆的施工及检修	复杂	简单	简单

注：计算环境温度按45°考虑。

关键词/Keywords
500 kV电缆·
隧道·
蛇形敷设·
预留段·

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在电缆隧道的尺寸方面，由于本工程隧道只敷设一回电缆，在一侧需布置低压电缆的情况下，三相垂直布置能有效利用隧道在竖向的空间，故其隧道所需的尺寸最小，且电缆施工、运行及检修相对简单，因此本工程采用三相垂直布置的方式。

2　电缆蛇形敷设形式的选择

2.1　电缆蛇形敷设的原因

当电缆中的负荷电流及周围环境温度变化时，电缆产生热胀冷缩的现象，因而在电缆线芯内部产生热机械力，其随着线芯截面积的增大而增大。电缆在热机械力的作用下将反复出现弯曲变形，使电缆金属护套产生疲劳应变，从而缩短电缆的使用寿命。热胀冷缩效应使运行中的电缆产生位移、滑落，严重的会造成电缆及附件的损坏，对电缆运行构成了极大的威胁。除了采用抗震性、耐蠕变性和抗张性良好的铝护套外，对500 kV电缆采用连续蛇形敷设的方法，可以吸收由热机械力带来的变形，减小电缆沿线的推力，将由于电缆的热胀冷缩给安全运行造成的威胁降低至最小。

2.2　电缆蛇形敷设的比较

当电缆敷设在隧道内时，轴向伸长产生的伸缩量往往会集中到电缆盘绕的弯曲处，从而使电缆在支架上隆起，并产生不规则的热伸缩滑移现象，影响电缆的运行安全。采用连续蛇形敷设的方法后，会将热伸缩滑移量分散到各个蛇形弧上，利用蛇形弧幅宽度来吸收电缆的热伸长量，并通过理论分析验证金属护套的畸变量在允许范围内。蛇形敷设参数的选择，应使电缆因温度变化所产生的轴向热应力无损于电缆绝缘，长期运行时不致使金属护套产生应变疲劳断裂。

（1）电缆水平蛇形敷设[10-12]

电缆水平蛇形敷设时，电缆温度变化产生的轴向力除了与电缆的抗弯度和本体重量产生的摩擦力有关外，还与电缆膨胀系数、温升及支架的摩擦系数有关。其蛇形弧幅为水平方向，需增加支架的宽度，隧道的尺寸也需增加。水平蛇形敷设如图4所示，其中L为半个蛇形节距，n为蛇形弧移动量，B为蛇形弧幅。

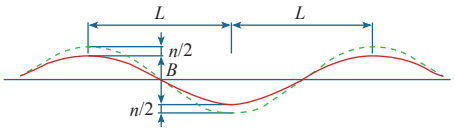

图4　水平蛇形敷设俯视图

（2）电缆垂直蛇形敷设

电缆垂直蛇形敷设的波形设计与水平蛇形设计类似，但蛇形弧幅为垂直方向，利用隧道的纵向尺寸，无须增加支架的宽度，如图5所示。

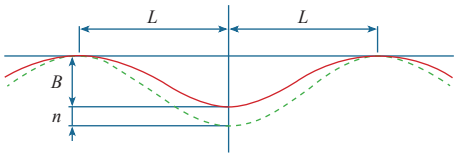

图5　垂直蛇形敷设断面示意图

（3）电缆水平蛇形敷设与垂直蛇形敷设的比较

水平蛇形敷设与垂直蛇形敷设均为电缆常用和可靠的敷设方式，有各自的优缺点，需根据工程特点选择合理的敷设方式。两种敷设形式的比较如表2所示。

表2　敷设形式特点比较

特点	水平蛇形敷设	垂直蛇形敷设
蛇形节距/m	一般6～10	一般4～6
弧幅取值	一般1.5～2倍金属护套的平均外径	一般1.5～2倍金属护套的平均外径
支架间距、数量及承重要求	0.8～1 m左右需敷设一套，电缆重量比较平均地分配在多个支架上，支架的承重要求低	支架间距与蛇形节距一致，数量大大减少，但支架需满足蛇形节距内电缆的重量、安装时的拉力等，承重要求高
支架宽度	较大，弧幅为水平方向，占用支架宽度	较小，弧幅为垂直方向，不占用支架宽度
隧道尺寸	较大	较小
电缆正常运行时的感应电压/V	相同	相同
工程投资	较大	较小

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 电缆蛇形敷设形式的选择

本工程共3台机组，A列外分别设置3个500 kV电缆隧道与升压站相连。选择合适的电缆敷设方式，缩小隧道的尺寸，不但能减小对A列外地下循环水管的影响，有利于循环水管的运行和检修，而且能有效降低工程投资，故电缆采用垂直蛇形的敷设方式。

3 电缆蛇形敷设参数的计算

垂直蛇形敷设的节距取6 m，弧幅取1.8倍铝护套的平均外径（电缆截面积为800 mm^2，铝护套的平均外径为128.5 mm），取值为230 mm，蛇形敷设参数计算依据式（1）～式（6），计算结果如表3所示。

蛇形弧移动量

$$n=\sqrt{B^2+1.6L^2\alpha t}-B \tag{1}$$

温度上升时的轴向力

$$F_1=-\frac{8EI}{B^2}\times\frac{\alpha t}{2}-\frac{8EI}{(B+n)^2}\times\frac{\alpha t}{2}+\frac{WL^2}{2(B+n)}\times 0.8 \tag{2}$$

温度下降时的轴向力

$$F_2=\frac{WL^2}{2B}\times 0.8 \tag{3}$$

电缆金属护套的应变ε

$$\varepsilon=\frac{D_S\pi^2 n}{(2L)^2} \tag{4}$$

表3 蛇形敷设参数计算结果

蛇形弧幅B/mm （230±10%）	207	230	253
移动量n/mm	41	38	35
移动后的总弧幅$B+n$/mm	248	268	278
温度上升时轴向力F_1/N	2 671	1 887	1 280
温度下降时轴向力F_2/N	4 348	3 913	3 557
金属护套的应变ε(%)	0.145	0.134	0.124

电缆在运行中产生的最大轴向力为4 348 N，则电缆末端固定夹具需两套（每套夹具的握紧力按照3 000 N考虑）；另外，金属护套的最大应变值为0.145%，小于0.3%的要求，故节距及弧幅的取值能够满足电缆运行的要求。最终的电缆蛇形敷设断面示意图如图6所示。

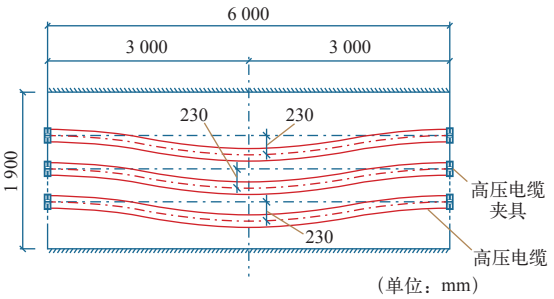

图6 垂直蛇形敷设断面示意图

4 回流线的设置

4.1 回流线的作用

金属护层单点接地的电缆线路在单相短路故障时，短路电流以回流线为回路。由于通过回流线的电流方向与电缆线芯的短路电流方向相反，形成较强的去磁作用，电缆周围的磁场被削弱，降低了电缆金属套上的工频过电压，保护了护套绝缘，提高了电缆的使用寿命。

4.2 回流线的设置原则

交流系统110 kV及以上单芯电缆金属层单点直接接地时，下列任一情况下，应沿电缆邻近设置平行回流线：①系统短路时，电缆金属层产生的工频感应电压超过电缆护层绝缘耐受强度或护层电缆限制器的工频耐压；②需抑制电缆邻近弱点线路的电气干扰强度。

回流线的选择与设置，应符合下列规定：①回流线的阻抗及其两端接地电阻应达到抑制电缆金属层工频感应电压，并应使其截面积满足最大暂态电流作用下的热稳定要求；②回流线的排列配置方式应保证电缆运行时在回流线上产生的损耗最小；③电缆线路任一终端设置在发电厂、变电所时，回流线应与电源中性线接地的接地网连通。

4.3 单相接地短路时感应电压的计算

系统发生单相接地短路（如A相接地短路），当无回流线时，A、B、C三相的感应电压分别为

$$U_A=\left[R+\left(R_g+\mathrm{j}2\omega\times10^{-4}\ln\frac{D}{r_s}\right)l\right]I$$

$$U_B=\left[R+\left(R_g+\mathrm{j}2\omega\times10^{-4}\ln\frac{D}{d}\right)l\right]I \tag{5}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$U_C=\left[R+\left(R_g+j2\omega\times10^{-4}\ln\frac{D}{2d}\right)l\right]I$$

式中，R为金属层单点接地处的接地电阻，Ω；R_g为大地的漏电电阻，0.049 3 Ω/km；D为地中电流穿透深度，m；d为电缆间距离，mm；l为电缆长度，km；I为短路电流。

系统发生单相接地短路（如A相接地短路），当有回流线且回流线按照近似“三七开”的方式布置时，A、B、C三相的感应电压分别为

$$U_A=\left(R_p+j2\omega\times10^{-4}l\ln\frac{D_A^2}{r_p r_s}\right)I$$

$$U_B=\left(R_p+j2\omega\times10^{-4}l\ln\frac{D_A D_B}{r_p d}\right)I \quad (6)$$

$$U_C=\left(R_p+j2\omega\times10^{-4}l\ln\frac{D_A D_C}{r_p 2d}\right)I$$

式中，R_p为回流线的总电阻，Ω；D_A、D_B、D_C分别为回流线至A、B、C相电缆的间距，m；r_p为回流线的等效半径，m；r_s为电缆金属套半径，m。

回流线的截面积为500 mm^2，半径r_p为0.027 m，电缆长度l为0.9 km，相间距d为400 mm，将相关参数代入式（5）～式（6），计算结果如表4所示。

表4　单相接地短路时感应电压计算结果

（单位：kV）

回流线的设置	U_A	U_B	U_C
无回流线	31.75	25.58	23.29
有回流线（近似“三七开”）	10.61	9.09	3.01

根据计算结果可知：当发生单相接地短路且无回流线时，A、B两相的感应电压将超过外护套工频耐压值25 kV，外护套绝缘将被破坏；而当设置回流线且回流线按照近似“三七开”的方式布置时，感应电压将大大降低，并被限制到外护套耐受值以内，有效地保护了电缆。回流线布置示意图如图7所示。

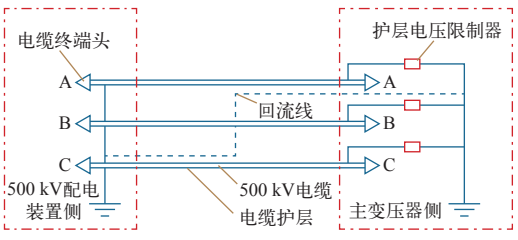

图7　回流线布置示意图

5　电缆预留段的设置

当电缆在运行过程中出现问题从而导致局部电缆故障且无法修复时，更换整条电缆将带来巨大的经济损失，设置电缆的预留段可以将此影响降到最低。部分水电站由于其GIS下的电缆夹层空间充足，可以在水平方向设置预留段，或者沿墙垂直设置预留段。而电网公司的500 kV电缆线路由于总长度较长，电缆均采用交叉互联的方式，电缆分盘长度为500～700 m，其按照分盘长度对电缆进行预留。本工程在A列外主变压器区域及GIS区域分别设置电缆的预留段，预留区域的电缆隧道顶部采用分体浇注的可活动盖板，并通过水泥砂浆对边缝填实以保证正常运行时的防水密封性，如图8所示。

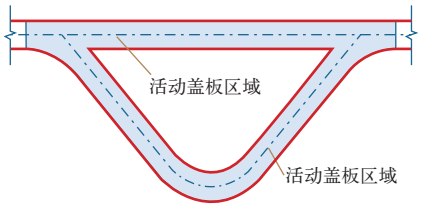

图8　电缆预留段示意图

6　结束语

国内500 kV超高压电缆依托可靠的技术、合理的价格和完善的服务，在火电厂中的应用日益增多。根据工程特点选择合理的电缆敷设方式，既能节省投资，又能保证运行的可靠性和后期维护的便利性。本文从布置方式、蛇形敷设形式、回流线及电缆预留段的设置等方面对隧道内布置的500 kV电缆进行探讨，分析各种敷设方式的特点，为500 kV电缆工程的设计提供参考依据。

参考文献

[1]　杨建军．天荒坪电站500 kV电缆的选型布置及安装试验 [J]．水力发电，2001 (6)：50-53．

[2]　王华军，陈昌斌，陈晓明．构皮滩水电站500 kV电缆选型设计 [J]．人民长江，2009，40 (2)：57-58．

(下转第42页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献

[1] 国家电网公司．Q/GDW 168—2008 输变电设备状态检修试验规程 [S]．北京：中国电力出版社，2008．

[2] 史传卿．电力电缆安装运行技术问答 [M]．北京：中国电力出版社，2002．

[3] 罗进圣．一起110 kV电缆安装缺陷的分析和处理 [J]．浙江电力，2002 (4)：37-39．

[4] 郑肇骥，王琨明．高压电缆线路 [M]．北京：水利电力出版社，1981．

[5] 王伟．交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础 [M]．3版．西安：西北工业大学出版社，2005．

[6] 黄鹤鸣．高压单芯电力电缆接地电流分析与监测系统研究 [D]．北京：华北电力大学，2008．

[7] 徐欣，陈彦．单芯高压电力电缆金属护套接地电流的研究之一——接地电流的计算和预控 [J]．电线电缆，2010 (5)：43-46．

[8] 牛海清，王晓兵，蚁泽沛，等．110 kV单芯电缆金属护套环流计算与试验研究 [J]．高电压技术，2005，31 (8)：15-17．

[9] 张全胜，王和亮，周作春，等，110 kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨 [J]．高电压技术，2005，31 (11)：71-73．

[10] 孙学锋，赵延华，路新波．高压单芯电缆护套接地电流的数模与应用 [C]．山东：山东电机工程学会第四届供电专业学术交流会论文集，2007：260-268．

[11] 高惠璇．统计计算 [M]．北京：北京大学出版社，2005．

[12] RogerA H，CharlesR J．i matrix analysis [M]．Translated by Yang Q．Beijing：Machinery Industry Press，2005．

[13] 王惠文，孟洁．多元线性回归的预测建模方法 [J]．北京航空航天大学学报，2007，33 (4)：501-504．

[14] 牛东晓，曹树华，赵磊．电力负荷预测技术及其应用 [M]．北京：中国电力出版社，2009．

[15] Tian Jiawei，Kamber M．Data mining：concepts and techniques [M]．America：Morgan Kaufman Publishers，2000．

（收稿日期：2015－08－28）EA

(上接第37页)

[3] 何善庆．大朝山500 kV XLPE电缆工程的设计安装和试验 [J]．云南电力技术，2003，31 (4)：33-37．

[4] 徐霞，王斌．电力隧道内长距离500 kV电缆敷设设计 [J]．华东电力，2010，38 (4)：29-32．

[5] 赵志栋．海淀500 kV电缆工程的技术研究与应用 [D]．北京：华北电力大学，2014．

[6] DL/T 5221—2005 城市电力电缆线路设计技术规定 [S]．

[7] 罗俊华，张丽，刘毅刚，等．超高压大截面电力电缆线路热膨胀计算分析 [J]．高电压技术，2010，36 (5)：1281-1286．

[8] 方浩．500 kV电缆在上海电网的应用 [D]．上海：上海交通大学，2008．

[9] 楚济祥．500 kV超高压电力电缆工程设计及施工关键技术研究 [D]．北京：华北电力大学，2011．

[10] 张学晋，吴安官，成健，等．解读高电压交联电缆蛇形敷设设计有关规定 [J]．供用电，2009，26 (6)：1-5．

[11] 徐伟，郑志源．隧道内电缆蛇形敷设特性 [J]．广东电力，2014，27 (12)：118-122．

[12] 赵志栋，张竟成，宋书辉，等．500 kV电缆蛇形敷设应用研究 [J]．中国电业：技术版，2014 (9)：48-50．

（收稿日期：2016－01－13）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net