

电力网与高电压技术选集

4

(广西电力技术1986年增刊)

广西电机工程学会
广西电力试验研究所

前 言

自1985年出版“电力网与高电压技术选集”第1、2、3集进行内部交流以来，有不少单位和读者要求把原目录预告的文章因资金不足而删减的部分再翻译出版。为了满足有关单位和读者的要求，现将所删减的文章加以整理汇集，且增加了一些新的文献作为该选集的第4集出版。

因水平有限，译之不当之处，望读者提出宝贵意见与指正。

1986年9月

果 迅 本 外 出 出 最 国 民 事

六相输电的稳定特性.....	(1)
纳尔逊河高压直流双极 1、2 控制系统并列运行研究.....	
——模拟研究.....	(11)
提高高压直流互联系统中瞬态稳定性的控制策略.....	(22)
高压交直流互联系统的状态估计.....	(30)
连接孤立沸水堆核电站的高压直流系统的协调控制装置.....	(37)
最小工作量准则在交互输电网络规划中的应用.....	(49)
特高压变压器绝缘长期可靠性的考察.....	(55)
特高压变电站的空气绝缘设计.....	(65)
采用真空断路器并联遮断强电流.....	(75)
光导纤维在高压变电站的通讯、测量与控制方面的应用.....	(84)
高压直流输电中的电力载波应用问题.....	(91)
高压直流卡勒尔滤波调制系统有功与无功控制设计.....	(98)
分裂导线的单极电晕.....	(107)
纳尔逊河直流高压输电线路的环境影响.....	(117)
高压输电线路声频噪音计算方法的比较.....	(127)
直流输电线路绝缘子串在污秽状态下的无线电干扰、 电视信号干扰和声频噪音的试验研究.....	(137)
交流输电线路下人体模型感应电场强度.....	(146)
变电所开关站最大大地电流计算.....	(153)
接地系统中的电流计算.....	(160)
土壤对故障电流的影响.....	(165)
气体绝缘变电站瞬态接地电位升 ——试验研究.....	(175)
气体绝缘变电站瞬态接地电位升 ——问题识别与减弱措施.....	(182)
气体绝缘变电站瞬态接地电位升 ——电击危害评价.....	(190)
变电站接地的计算机辅助设计.....	(200)

6 相 输 电 的 稳 定 特 性

〔日〕 高崎昌洋 等

一、前 言

现在,输电线路用地正越来越变得困难,在相同的空间谋求系统的大容量化,成了重要的课题。为了有效利用输电空间,提出了多相输电(用6相、12相或其以上的相数输电)。关于多相输电线路的特性,已经报导了几个解析结果,对这些结果进行考察,得出多相输电具有的最重要的性质是,如果地对地电压相同,则相间电压随着相数的增加而减小,因而,相间距离就有缩小的可能。

本论文着眼于6相输电线路的稳定特性,首先就导线表面电位梯度、地表面电位梯度、坡印廷矢量的分布、能量的流动等四个研究项目进行下面的比较:

○3相2回线和6相1回线的比较。

○相排列不同的6相线路间的比较。(将3相2回线6相化,有16种相排列)。

进行这些比较之后,考察了比较基准,从导体表面电位梯度方面,考察了用6相线路使系统大容量化的可能。此处,若归纳本论文的特征,得出以下3点:

(1)、我国3相2回线比较多,由于3相2回线不需新增补导线,就能作为6相线路,所以提出了把3相2回线作为实现6相输电的第1种方案。

(2)、输电线周围的能量分布成为有效利用空间的一个指标。本文解析清楚输电线路周围的能量分布,在此基础上,考虑了有

效利用6相输电的方法。

(3)、弄清了由于6相线路的相排列不同,而引起的稳定特性的变化。

二、电场、磁场分布的计算法

1、模型系统

作为进行解析的模型系统,首先考虑3相2回线的6相化,采用1条实际线路(154kV, 3相2回线,导线 240mm^2 ACSR,全长 256km)作为模型系统。图1表示该线路的导线布置,导线布置的尺寸应严格取间距的平均值,这里采用铁塔的值。另外,从利用6相电压的优点看,对于图2所示的环状布置,也有必要先进行考察。图2是设图1的中间导线的高度固定不变,不改变最小相间距离,将图1环状化得到的布置。后面分别称这两个布置为导线布置1、导线布置2。

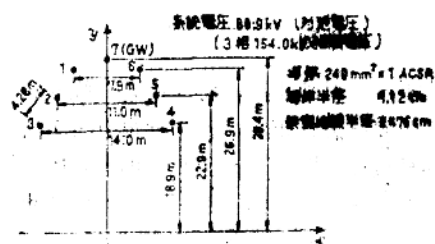


图1 导线布置1

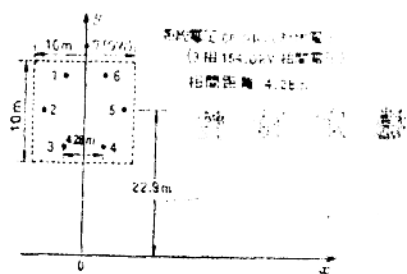


图2 导线布置2

2、研究项目

为了分析实现6相输电的可能性，在基础特性中，提出下面稳定状态下的（1）～（4）项作为研究项目。

（1）、导线表面电位梯度

导线表面电位梯度是决定电晕的重要因素。

（2）、地表面电位梯度

对于EHV（超高压）、UHV（特高压）系统，从环境方面考虑，地表面电位梯度有可能成为设计的基准。这里作为模型系统的是154kV系统，而地表面电位梯度，一般由于多相化而增大，所以设置这一项目。

（3）、坡印廷矢量的分布

（4）、能量的流动

（3）、（4）分别表示能量流动的面积密度及面积积分值。用它来解析清楚6相线路周围的能量分布，弄清6相输电的优点。

3、相排列

不改变对地电压，将3相2回线6相化时，任导线怎样布置，相排列也有表1所示的16种可能。图3为6相电压的矢量图，图4为3相电压矢量图。对于3相2回线也考虑同在表1表示的2种相排列。从而共有18种相排列作为考察的对象，下面为了简单起见，用表1所示的号码称呼各种相排列。

表1 6相1回线、3相2回线的相排列

（相顺序按图1所示导线1～6的顺序）

6 ϕ 1cct	①ABCDEF	6 ϕ 1cct	⑪AEDCBF
	⑫AECDBF		⑫AEDFBC
	⑬ABFDEC		⑬ACDBFE
	⑭AEFDBC		⑭ACDEFB
	⑮ACBDEF		⑮AFDBCE
	⑯ACEDBF		⑯AFDECB
	⑰AFBDEC		
	⑱AFEDBC	3 ϕ 2cct	①abcba
	⑲ABDCEF		②abcab
	⑳ABDFEC		

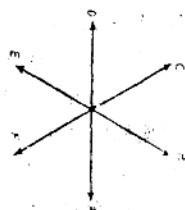


图3 6相电压矢量图



图4 3相电压矢量图

4、计算式的导出

当计算电场、磁场、坡印廷矢量时，作下面认为妥当的假设。

（1）、大气中的电场、磁场，由各导线上的电荷及流过导线的电流来决定。

（2）、输电线由张拉在平坦地面上的 n 根平行导线组成，忽略支持塔架、邻近物体的影响。并且忽略掉输电线的电阻及流过架空地线的感应电流。

（3）、计算电场、磁场时，采用镜像

法。计算电场时,可以把大地看作为理想导体。计算磁场时,必须考虑大地的电阻率,设 $\rho=100\Omega\cdot m$ 、 $f=50Hz$,镜像的等价大地深度 y'' 为

$$y''=755\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1)$$

采用由此理论式求得的 $y''=1067m$ 值。

在以上的假设下,若忽略在架空地线上感应的电压,在各导线的电荷 q_i 和电压 V_j 之间,有如下的关系:

$$q_i = \sum_{j=1}^{nac} c_{ij} V_j \quad (2)$$

式中, C_{ij} 为电容感应系数, nac 为除掉架空地线的导线数。若求这些导线 i 的表面电位梯度 E_i ,设导线 i 的半径为 r_i ,则

$$E_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r_i} \sum_{j=1}^{nac} c_{ij} V_j \quad (3)$$

此外,若设导线的座标为 (x_i, y_i) ,任意点 $P(x, y)$ 到导线 i 及到 i 的镜像导线的距离分别为 D_i 、 D_i' ,则在 P 点的电场 E 由各导线的电场矢量合成来求取,得下式:

$$E = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nac} \left(\frac{1}{D_i^2} - \frac{1}{D_i'^2} \right) c_{ij} V_j (x-x_i), \right. \\ \left. \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nac} \left(\frac{y-y_i}{D_i^2} - \frac{y+y_i}{D_i'^2} \right) c_{ij} V_j \right) \quad (4)$$

式中 n 为包含架空地线在内的全部导线数。设 P 点到镜像导线的距离为 D_i'' (镜像深度 $y''=1067m$),导线 i 的电流为 I_i ,则在 P 点的磁场为

$$H = \left(\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{nac} I_i \left(\frac{y-y_i}{D_i^2} - \frac{y+y_i}{D_i'^2} \right), \right. \\ \left. \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{nac} I_i \left(\frac{-1}{D_i^2} + \frac{1}{D_i'^2} \right) (x-x_i) \right) \quad (5)$$

因此,坡印廷矢量的大小 $S = |E \times H|$ 为

$$S = \frac{1}{4\pi^2\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nac} \sum_{k=1}^{nac} c_{ij} V_j I_k A_{ijk} \quad (6)$$

式中:

$$A_{ijk} = \left(\frac{y-y_i}{D_i^2} - \frac{y+y_i}{D_i'^2} \right) \left(\frac{y-y_k}{D_k^2} - \frac{y+y_k}{D_k'^2} \right) \\ - \left(\frac{1}{D_i^2} - \frac{1}{D_i'^2} \right) \left(\frac{-1}{D_k^2} + \frac{1}{D_k'^2} \right) \\ \times (x-x_i)(x-x_k)$$

导线表面电位梯度、地表面电位梯度、坡印廷矢量由以上(3)、(4)、(6)

式求得,但都是瞬时值,它们的图形必须按随时间变化的量来处理。

对空间的电场,一边让其大小发生变化,一边使其旋转,画所谓的矢量轨迹,在导线表面、地表面随时间变化的矢量轨迹为直线。即导线表面、地表面的电位梯度一同具有有效值或最大值,同时是可以表示的。本文采用有效值。另外,对于坡印廷矢量,将其分解为直流分量(表示有功功率的流动)和交流分量。现将某导线的电压、电流瞬时值分别表示为

$$V_j = V_j \sqrt{2} \cos(\omega t - \phi_j) \quad (7)$$

$$I_k = I_k \sqrt{2} \cos(\omega t - \phi_k - \varphi) \quad (8)$$

式中, $j, k=1 \sim nac$, φ 为电压、电流的相位差。若将(7)式代入(3)式,求导线表面电位梯度的有效值 E_{si} ,则

$$E_{si} = \frac{V}{2\pi\epsilon_0 r_i} \left(\sum_{j=1}^{nac} c_{ij} \cos\phi_j \right)^2 \\ + \left(\sum_{j=1}^{nac} c_{ij} \sin\phi_j \right)^2 \quad (9)$$

设(4)式中的 $y=0$, $D_i=D_i'$,将(7)式代入(4)式,地表面电位梯度有效值 E_g 则为

$$E_g = \frac{V}{\pi \epsilon_0} \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_{ac}} \frac{y_i}{D_{ij}^2} c_{ij} \cos \phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_{ac}} \frac{y_i}{D_{ij}^2} c_{ij} \sin \phi_j \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

关于坡印廷矢量，将(7)、(8)式代入(6)式，求得其直流分量为

$$S_{dc} = \frac{VI}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_{ac}} \sum_{k=1}^{n_{ac}} c_{ij} A_{ik} \times \cos(-\phi_j + \phi_k + \varphi) \quad (11)$$

最后列举计算时应注意的问题。

(1)、关于导线表面、地表面电位梯度，设加在各导线的对地电压(88.9kV)固定不变，用(9)、(10)式来进行计算。

(2)、坡印廷矢量值，在(11)式中， $VI \neq 1$ ，即把每1导线(在分裂导线中为每相)的容量作为1个单位。再有设电压、电流的相位差 φ 为0。

三、6相输电线路的稳定特性

本节，在对用6相输电线路使系统大容量

化进行考察之前，先弄清6相输电线路的稳定特性。应注意的事项是，进行各特性比较时，设导线的布置固定不变，即不考虑由于6相化相间电压平衡降低，而使相间距离缩小这一情况。

1、导线表面电位梯度

表2表示导线布置1的导线表面电位梯度的有效值。表中Max是1~6导线中的最大值， $P \cdot U \cdot$ 是以6相1回线的①为基准进行计算的相对值。

首先，比较3相2回线和6相1回线，就看出，一般由于6相化，导线表面电位梯度有所降低。6相1回线中导线表面电位梯度最小的相排列是①，最大的是⑥。另外，在⑥中，若进行6相化，导线表面电位梯度反而增大。而且导线表面电位梯度最小的①比第2、第3小的⑧、⑤分别小9.9%，11.7%，比3相2回线也小22.5%。

下面表3表示导线布置2的导线表面电位梯度。

与表2比较，若用环状布置，虽不能说导线表面的电位梯度在全部的排列和全部导线都上升，但有若干排列和导线是上升的。

表2 导线表面电位梯度(布置1)

相排列	导线表面电位梯度 (kV/cm)						Max	P.U.
	1	2	3	4	5	6		
6相 ①	11.1	10.4	11.0	11.1	10.4	11.0	11.1	1.000
②	12.5	13.6	12.6	12.5	13.6	12.6	13.6	1.225
③	11.1	12.3	12.3	12.6	12.4	10.4	12.6	1.135
④	12.6	12.4	10.4	11.1	12.3	12.3	12.6	1.135
⑤	12.2	12.4	10.4	11.2	10.4	11.0	12.4	1.117
⑥	12.5	13.7	12.7	12.9	13.5	12.6	13.7	1.234
⑦	11.1	12.4	12.3	12.9	12.2	10.4	12.9	1.162
⑧	11.4	10.4	11.0	11.3	12.2	12.2	12.2	1.099
⑨, ⑩	11.3	12.2	12.9	11.3	12.2	12.9	12.9	1.162

相排列	导线表面电位梯度 (kV/cm)						Max.	P.U.
	1	2	3	4	5	6		
⑩, ⑬	12.0	12.0	13.0	13.3	12.1	11.3	13.3	1.198
⑪, ⑭	12.8	11.9	11.2	12.8	11.9	11.2	12.8	1.153
⑫, ⑮	13.3	12.1	11.3	12.0	12.0	13.0	13.3	1.198
3相 ①	12.4	13.6	12.6	12.4	13.6	12.6	13.6	1.225
②	13.3	13.6	12.7	13.3	13.6	12.7	13.6	1.225

表 3 导线表面电位梯度 (布置 2)

相排列	导线表面电位梯度 (kV/cm)						Max.	P.U.
	1	2	3	4	5	6		
6相 ①	11.3	11.1	11.1	11.3	11.1	11.1	11.3	1.000
②	12.5	13.2	12.4	12.5	13.2	12.4	13.2	1.168
③	12.4	12.3	13.3	13.3	12.3	12.3	13.3	1.177
④	13.3	12.3	12.3	12.4	12.3	13.3	13.3	1.177
⑤	12.4	12.4	12.5	11.4	11.2	12.2	12.5	1.106
⑥	12.4	13.5	12.7	12.9	13.5	12.2	13.5	1.195
⑦	12.3	12.6	13.6	13.6	12.6	12.2	13.6	1.204
⑧	12.3	11.2	11.3	12.5	12.5	12.2	12.5	1.106
⑨, ⑯	11.4	12.2	12.5	11.4	12.2	12.5	12.5	1.106
⑩, ⑰	12.7	12.2	13.6	13.7	12.1	12.7	13.7	1.212
⑪, ⑱	12.7	12.2	11.3	12.7	12.2	11.3	12.7	1.124
⑫, ⑲	13.7	12.1	12.7	12.7	12.2	13.6	13.7	1.212
3相 ①	12.1	13.6	11.9	12.1	13.6	11.9	13.6	1.204
②	13.8	13.6	13.7	13.8	13.6	13.7	13.8	1.221

这是由于所有导线的相间距离缩小了的缘故 (特别是 3、4 号导线之间)。而且, 即使是在环状布置的情况下, 6 相 1 回线的导线表面电位梯度也比 3 相回路的小, 6 相 1 回线中最小的相排列仍然是①。最大的是⑩、⑫、⑬、⑮, 比①也增大 21.2%。而且①比 3 相 2 回线小 22.1%, 比 6 相 1 回线中依次小的⑤、⑧、⑨、⑯小 10.6%, 与布置 1 的情况相比, 其差就更大。一般的趋势是, 不管导

线是哪种布置, 导线表面电位梯度最小的相排列 (即应该说作为基准的相排列) 是①, 随着相排列号码变大, 导线表面电位梯度也变大。例如, ①的下面, 导线表面电位梯度小的⑤、⑧, 无非是调换了①的 BC 相的相排列而已。

2、地表面电位梯度

图 5 是布置 1 的地表面电位梯度剖面

图。它只表示有特征的相排列。

布置1的地表面电位梯度剖面图可以分为3大类。即

(1)、是对称的,在 $\pm 10m$ 附近地表电位梯度有最大值,属这类的有①、④、⑭、3相②。

(2)、在导线中央附近,地表电位梯度有最大值,属这类的有②、⑥、⑨、⑯、3相①。

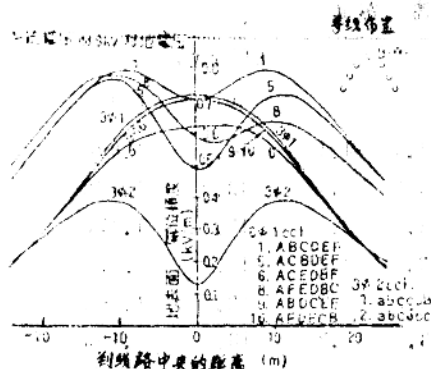


图5 地表面电位梯度剖面图(布置1)

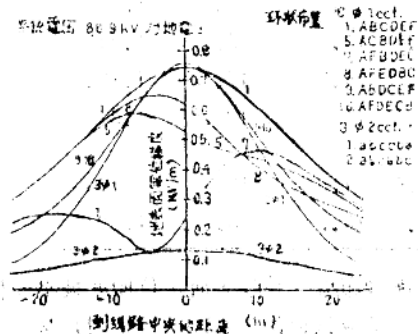


图6 地表面电位梯度剖面图(布置2)

(3)、地表面电位梯度在单侧的水平低,在 $\pm 10m$ 附近有最大值,属这类的有③、⑤、⑦、⑧、⑩、⑫、⑬、⑮。一般,由于6相化,地表面电位梯度增大,导线表面电位梯度小的相排列有变大的趋

势。

下面图6是布置2的地表面电位梯度剖面图。这种布置有下面两类:

(1)、在导线中央附近,地表电位梯度有最大值。

(2)、地表面电位梯度在单侧的水平高,在 $+10m$ 或 $-10m$ 附近有最大值。

总之,由于布置2与布置1不同,布置2下边导线的间隔小,所以在导线中央地表面的电位梯度稍变大,而铁塔边缘外侧的地表面电位梯度被抑制得相当小。若认为导线布置即使环状化,其导线表面的电位梯度也不怎么增加的话,则由此也就明确了环状布置的优点。另外,在布置2中,导线表面电位梯度、地表面的电位梯度哪一个都小的相排列有⑤、⑨、⑯。

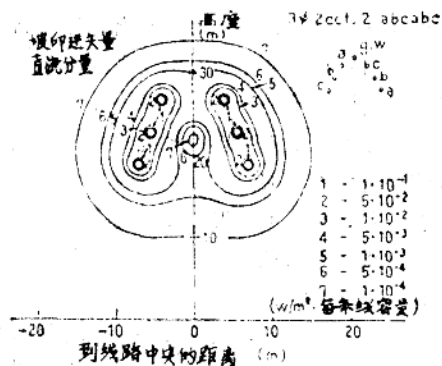
此处,通过导线表面电位梯度、地表面电位梯度的结果,清楚地看出:相排列⑨和⑯、⑩和⑮、⑪和⑭、⑫和⑬完全相等,③和④、⑥、⑮和⑫、⑬是对称于中央线的。这是由于假定加在各导线的电压矢量的相对关系是相同的,从而电场、磁场的分布完全相同的缘故。由此表4重新汇总6相1回线的16种相排列。

表4 相排列1~16的汇总

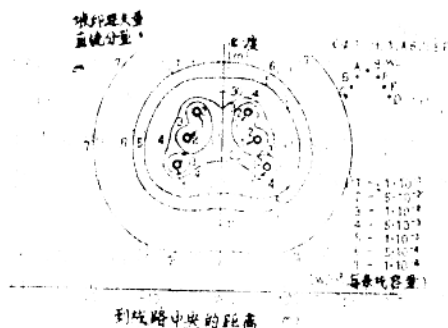
序号 (No.)	相排列	序号 (No.)	相排列
1	①	6	⑦
2	②	7	⑧
3	③、④;(对称)	8	⑨、⑯
4	⑤	9	⑩、⑮、⑫、⑬
5	⑥	10	⑪、⑭

3、坡印廷矢量的分布

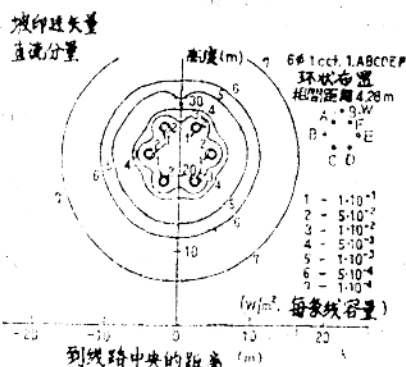
坡印廷矢量表示能量流动的面积密度,如果从空间的有效利用方面来考虑,最好是尽可能将其均匀化,(从面积密度看为平滑



(a) 等坡印廷矢量线 (布置1, 3相2回线②)



(b) 等坡印廷矢量线 (布置1, 6相1回线①)



(c) 等坡印廷矢量线 (布置2, 6相1回线①)

图 7

化)。而且由于在导线表面的值成为其最大值, 所以, 在相同的导线布置中进行比较时, 导线邻域的密度低, 坡印廷矢量分布呈全部变宽的分布状态, 故相间距容易缩小。

能量流动的瞬时值随时间而变动, 它由直流分量和频率为工频2倍的交变分量组成。直流分量表示有功功率流动的面积密度, 以下若只提到坡印廷矢量, 是指此直流分量。图7(a)~(c)就是用等高线分别表示布置1的3相2回线②和6相1回线①及布置2的6相1回线①的坡印廷矢量直流分量。若首先比较图7(a)和(b), 就知道6相线路的所有坡印廷矢量等高线都变宽, 或者从坡印廷矢量在导线间的空间密度这一点看, 可以谋求空间的有效利用。不过在布置1那样的导线布置中, 要将全部输电能量围在导线附近(考虑10m正方形的范围)的面积内是困难的, 若为6相线路, 即使怎样做, 输电能量在输电线周围也是大的。那末象图7(c)那样将6相线路的导线布置环状化, 空间的利用率好, 而且输电能量在输电线的周围也小。

再者, 为了详细地研究密度分布, 将布置2中中央导线(图2中的第2、第5导线)高度的水平方向的坡印廷矢量分布情况表示在图8中。图8仅表示6相1回线①、⑤、⑨、⑬和3相2回线②的情况, 而即使把全部的相排列都进行比较, 导线表面电位梯度最小的①仍然是最好的分布。在①的线路中央附近的密度比⑤、⑨、⑬高40%左右。再有, 若对于布置1, 也象图8那样绘图进行比较, 这时①、③、⑤、⑧成为面积密度一样的相排列。它们当中和其它最一样的仍然是①, 其线路中央附近的密度比⑤、⑧高20%左右, 比③高45%左右。

此处, 先就坡印廷矢量这个量进行考察。首先, 导线表面的坡印廷矢量与导线表

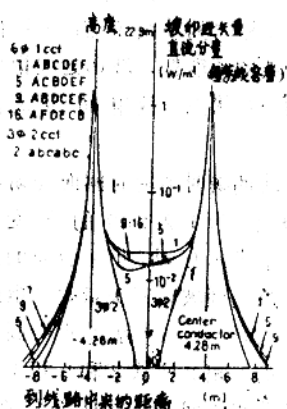


图8在中央导线高度的坡印廷矢量(布置2)

面电场成比例。这是由于下面的缘故，即因为导线布置和相排列变化时，在导线表面的磁场，大体上只是由流过此导线的电流来决定，所以对于固定的磁场来说，电场由于感应系数的变化，比磁场变化大。其次，若比较图7(d)~(c)和图5、图6，就清楚地看到，根据地表面的坡印廷矢量可以粗略地知道地表面的电位梯度。

综上所述，由于坡印廷矢量表示输电空间全领域的能量分布，所以坡印廷矢量在用变换导线布置的方法来提高空间利用率方面，还有在考虑多回线通过固定空间时，导线布置的最佳化方面，都是有用的。即对于以前的3相线路，同样也对于6相线路，绝缘距离、导线表面和地表面的电位梯度这些量作为设计基准都是满足要求的，但在通过掌握输电空间全领域的状态来考虑导线布置最佳化时，使用坡印廷矢量则是方便的。

4、能量的流动

在(三·3)节是把坡印廷矢量作为能量流动的面积密度来考察，而本节是就其面积积分值，即能量的流动来进行考察。

以前，一般认为在水平布置的3相1回线中，在把相间距离的5%作为半径的圆柱

内包含了全部能量的95%以上。那末，若首先取文献(8)所示的导线排列例子试实际进行计算，则就会看出相间距离和导线高度诸条件引起的能量变化，只是占20%左右。即使根据极简单的计算，也认为不是95%以上。实际上，输电线周围的能量流动，没有以前的说法那样偏重，而是即使在布置1、或者布置2那样的情况，不管是3相还是6相，在相间距离的5%内包含的能量，也只是40~50%左右。

在导线布置2，将图2中虚线围住的 $10 \times 10m$ 的正方形区域所包含的能量，分成以相间距离的10%及其以外部分进行计算，下面表5是计算的结果。由此结果可以得出下面两点：

(1) A_2 内所包含的能量，6相1回线比3相2回线的大2~4.5%左右，而在 A_1 (相间距离的10%)内所包含的能量也比3相2回线的小5.9~11.3%，能量的流动比较均匀化。

(2) 流到 $10 \times 10m$ 区域外的电能，6相1回线比3相2回线大4~7%，假如导线布置相同，6相线路流向外部的能量大。

表5 在图2所示 $10m \times 10m$ 的区域内所包含的能量

相排列	包含的能量/全部能量(%)		
	A_1 : 相间距离的10%	A_2 : A_1 以外的部分	$A_1 + A_2$: 面积 $10m \times 10m$
6相1回线①	51.6	35.4	87.0
3相2回线①	57.5	33.5	91.0
3相2回线②	62.9	31.0	93.9

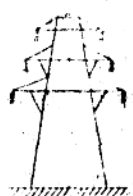
四、用6相线路使系统大容量化的计策

作为6相化使系统大容量化的计策，根据前章的结果，可以考虑缩小相间距离或者

升高系统电压。因此在本章,就下面这些问题进行考察:即根据这些计策,究竟能增加多少输电容量呢?另外,这时重要的是哪几点呢?

将模型系统的3相2回线路6相化,想在相同的输电空间实现大容量化,这时考虑的方法有下面3种:

- (1)、原封不动地使用原来的铁塔,而用改变导线布置来提高系统电压。
- (2)、采用图9(b)所示的盒式铁塔,用环状布置使系统电压升高。
- (3)、采用盒式铁塔的同时,缩小相同距离,以谋求多回线。



(a) 模型系统的铁塔
安装图



(b) 6相输电线路的铁塔
示意图

图9

但是,以下相排列只就6相1回线①和3相2回线②进行讨论,考虑用导线表面电位梯度作为比较的标准。这是因为如果不考虑由于雷击、导线不稳定的跳动等所引起的闪络,在稳定状态,最成为问题的是决定电晕大小的导线表面电位梯度。而且,极其靠近导线的区域的坡印廷矢量大致上和导线表面电位梯度成比例,所以从能量密度角度看,选取导线表面电位梯度作为比较的基准也是妥当的。

那末,首先考虑上述方法(1)。在以前的铁塔结构中,用升高系统电压来谋求增加输电容量,是因为在图9所示的线路间存在着铁塔,不容易改变相同距离。现与3相2回路相比,6相1回路的导线表面电位梯

度仅降低22.5%,根据导线表面电位梯度小的表2,假设导线本身也不变换,那么反过来6相1回线的对地电压可试升高22.5%。这样一来,6相线路导线表面电位梯度和3相2回线相同时,仅用6相化,容量也只能提高20%左右。这是因为决定导线表面电位梯度的主要因素是导线的半径,所以在以前的铁塔结构上,为了升高系统电压,非要使用分裂导线不可。再有,地表面电位梯度象在前面论述的那样也容易成为一个问题,而且这时与铁塔的绝缘要求也必须满足要求,因此事实上方法(1)成为相当困难的方法。即在我国铁塔结构,即使仍旧将3相2回线6相化,也没有充分利用6相电压所具有的优点。

其次,考虑实施图9(b)那样的盒式设计。若这样做,与6相化相结合,线路下用地就狭小,且导线和铁塔的绝缘也容易满足要求。作为这情况下的大容量化计策,有前述的(2)、(3)两种方法。(2)和(1)一样,若不变换导线,系统电压的升高限度只为20%左右,而若为分裂导线,则系统电压的升高可能达到 $\sqrt{3}$ 倍或 $\sqrt{3}$ 倍以上。但是,由于坡印廷矢量的分布是由导线的布置来决定,所以在固定的空间内,通过尽可能多的导线,能增大空间的能量密度。由此,固定系统电压不变,考虑多回线的便是方法(3)。那末,首先试考虑用6相线,相间距离有可能缩小到什么程度。再有,当改变导线布置时,中央导线的高度保持为22.9m不变。

在6相1回线,相间电压平衡降低,若把相间距离缩小下去,即使缩小到原来的 $1/\sqrt{3}$,6相1回线导线表面电位梯度对于3相2回线也还有8.8%的裕度,当开始缩小到1.42m,即相当于原来的 $1/3$ 时,6相1回线的导线表面电位梯度达到与3相2回线相同的数值。即相间距离应有可能缩小到原来

的 $1/3$ ，而实际上，是大体把对于各系统电压不发生闪络的最小距离确定为绝缘设计的基准，而不考虑可能缩小到这个数值。但是，从这个结果反推，即使把相间缩小到 6 相化后实际上可能缩小的程度，电晕比 3 相 2 回线常常还减轻，这点是非常重要的。

图10 表示相间距离为 $1.42m$ (4.28 的 $1/3$) 时的坡印廷矢量分布。就是和图 7 (a) 比较也会看出，导线附近的能量密度是相当高的。从而由此容易想象随着相间距离变小，地表面电位梯度也变小。另外，即使是

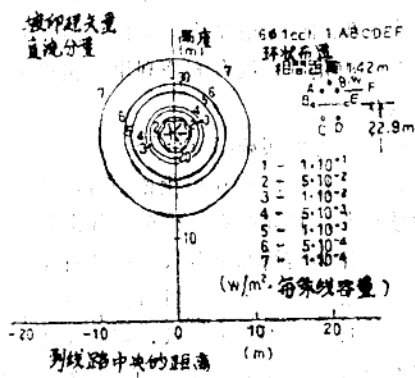


图10 等坡印廷矢量线
(环状布置，相间距离 $1.42m$ ，6 相 1 回线①)

使其达到了这样稠密化的状态，若从连结各导线所成的圆的圆心沿放射方向看去，则知道坡印廷矢量减少的比例也是相当大的。即连结各导线得至一个圆，以此圆直径的 2 倍为半径作圆，在这样的圆的圆面上，能量密度也降低至 $1/10$ 。这意味着，若合在一起考虑极靠近导线的区域的能量密度大体上与导线表面电位梯度成比例，则在 1 回线的周围，以大致相同的导线间隔通过多根导线是可能的。如果根据简单的计算，若相间距离缩小到 $1/\sqrt{3}$ ，则输送相同的电力所必需的面积只用原来的 $1/3$ 。另一方面，如果和布置 1 的导线布置比较，其值甚至为 $1/5$ 。因此，把图 1 那样的模型系统作成环状布置

的 6 相线路，至少可以输送 5 倍的电能。

由于表 6 与表 5 有关，所以表 6 同样表示在 $10 \times 10m$ 的区域内包含的能量。但是，

表 6 $10m \times 10m$ 的区域内包含的能量
(环状布置，相排列 6 相 1 回线①)

相间距离 (m)	包含的能量/全部能量 (%)		
	A_1 半径 $0.428m$ 的圆柱内	A_2 : A_1 以外的部分	$A_1 + A_2$ 面积 $10m \times 10m$
4.28	51.6	35.4	87.0
2.48	56.4	39.4	95.8
1.42	63.8	34.8	98.6

考虑相间距离发生变化， A_1 为在圆 定半径是 $0.428m$ 的圆柱内所包含的能量。若相间距离缩小至 $1.42m$ ，则大部分的能量被包含在这区域内，而且这能量增加的部分是在 A_1 ，即在导线的邻域。另外，即使和表 5 的 3 相 2 回线比较，在 A_1 所包含的能量也是大的。由此，如果将能量密度均匀化，则相间距离缩小是成为可能的事。这就明确了一缩小到容许的限度，能量就在导线附近集中流过等多相化的一系列优点。

五、结 论

若归纳本文考察所得的结论，得到以下几点：

(1)、关于 6 相输电线，实际上成为可能的相排列有 10 种。

(2)、能量流动的面积密度由于 6 相化而变得均匀。变得最均匀的是导线表面电位梯度最小的相排列① (表 2)，因而，当地表面电位梯度不成为问题时，这个排列成为最佳的相排列。

(3)、输电空间的能量流动，没有以前的说法那样偏重。尽管如此，起支配作用的仍是极靠近导线的区域，在固定的空间通过尽可能多的导线，这一方法的空间利用率好。

(4)、为了有效地利用多相输电的优点,必须实现输电线路的盒式化。这是由于下述理由。

由于现在的铁塔结构,存在以下问题:

①地表面电位梯度容易成为问题。

②在导线间设置铁塔,为了保持与铁塔的绝缘距离,要变动相间距离是困难的。

③谋求多回线时,不论是从导线附近的能量密度看,还是从与能量密度有关的导线表面电位梯度来看,在1回线,能以大致相同的导线间隔配置导线,对这一优点,现在的铁塔结构不能有效利用。

(5)、考虑6相1回路时,如果实施

盒式设计,输送固定的电力所需的空间,只用通常导线布置所需空间的1/5左右就行了。还有在实用上,相间距离即使选怎样的值,导线表面电位梯度也比3相2回线的低。

再者,以上的结论是只考虑稳定状态,最终的结论还应该根据事故特性的解析结果来做出。

参考文献(略)

译自日刊《电气学会杂志》,B)1982年No.4

张峰译 肖革 校

纳尔逊河高压直流双极1、2 控制系统并列运行研究——模拟研究

(加) John McNichol (德) S. T. Ranade H. Ring D. Meyl

一、前 言

加拿大马尼托巴水电局纳尔逊河高压直流输电系统是目前世界上正式运行的最大高压直流系统。这条高压线将马尼托巴省北部纳尔逊河诸水电站的电力输送到马托巴省南部温尼伯附近,输电距离约900公里。双极1使用汞弧阀,其额定功率为1620兆瓦,±450千伏,1800安,第一期工程于1977年投产运行。双极2装有水冷可控硅阀,其额定值是1300兆瓦,±500千伏,1800安。第一期工程(900兆瓦,±250千伏,1800安)于1978年10月正式运行。马尼托巴水电局计划在双极2建成以后,要求采用高压速动开关(高速并列)使双极1和双极2并列运行。在将来建设第三条双极线,那时也可能与双极2并列运行。

高压直流变电站各极并列运行是多端运行的一个简单情形,而多端运行本身已进行长期讨论。但是,并列运行实践方面的结果只是从卡布拉巴萨——阿波罗高压直流输电工程(慢速并列)获得的。纳尔逊河高压直流输电系统将是第一个使用高速并列的系统。

本文介绍纳尔逊河高压直流输电工程在双极1和双极2并列,并列运行以及解列运行时的控制和保护系统。同时还介绍了为证实控制系统的有效性而进行的模拟研究,所提出的控制系统可适应于各种并联整流器的不同地点。对于并联逆变器也同样如此。

本文还证明,采用适当控制保护系统,就可使两条额定电压和电流相同,但使用不同厂家供应的不同换流器技术的双极线以高速并列运行,以提高整个高压直流系统的输

电能力。

二、直 流 电 路

图1为纳尔逊河高压直流输电双极1和双极2并列运行的直流电路图。双极2和双极3将来并列运行的直流电路见文献(3)。高压速动开关(hvhs)没有任何的遮断能力,即它必须在电流过零时断开。在接到相应的命令之后,大约在70毫秒之内即可闭合和断开。为了辨别直流线路故障及直流电抗器与高压速动开关之间区段的故障,设有非常备用直流电流互感器(不是安在直流电抗器套管上)。

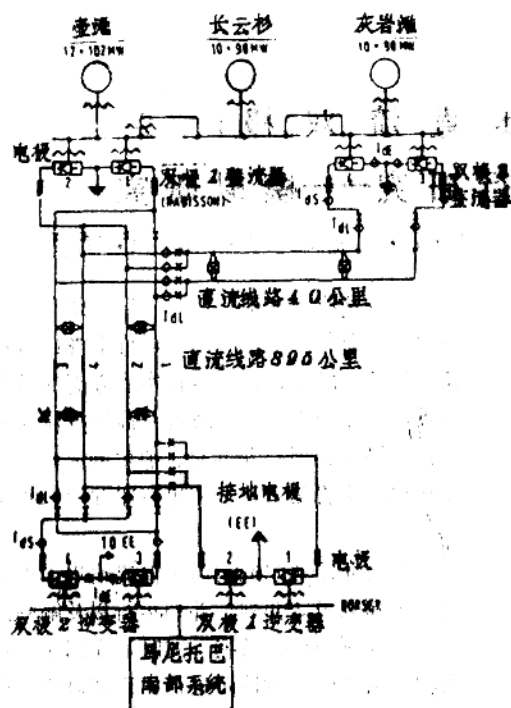


图1 纳尔逊河高压直流输电系统

符号注释: x——高压速动开关

b——直流测量电流互感器(只有双极2示有)

在双极单独运行时,高压直流变电站各

极一般按下列分配给各直流线路:极1一直流线路3、极2一直流线路2、极3一直流线路1、极4一直流线路4。变电站极1与极3可在直流线路1或3上并列运行,变电站极2和极4可在直流线路2和4上并列运行。当并列运行时由于换流器发生故障,变电站的某一极就可从它的正常直流线路断接,而使变电站其他各极在“不正常线路”上运行。这种运行方式是可以的。但是不可能在单独运行时将变电站的某一极引入“不正常线路”。这样,变电站的故障极,在检修以后,或者必须在自己的线路单独运行,或者在变电站其他极的路线并列运行。

三、并列运行的控制系统

并列运行时,双极1和双极2的各自控制和保护系统(4、5)仍在运行。但是,在并列运行时可能启动其他的控制系统。本书就是讨论并列运行中的控制和保护系统、及其在系统故障情况下的特性。在功率控制方式中,两个双极的功率等级是根据其中一个双极来整定的。就是说,双极功率等级的变化影响着该双极高压直流输电系统的两个电极,单独运行时系统电极和并列运行时的系统电极。系统电极中每个电极可以是功率控制方式,也可以是电流控制方式。

1、并列逆变器之间的电流分配

并列逆变器可用这样的方法来控制,即使每台逆变器所需的电流等于其整流器供应的电流。为达到此目的,安装一台比例积分式电流差动控制器(CDC),如图2所示。因为只有这样一个控制器积分部分的控制特性可以应用。因此它包括在双极2的逆变器电极控制中。

由于稳态电流分配的最大误差仅是 $\pm 0.1I_{dN}$,电流差动控制器的输出限于 $\pm 0.15I_{dN}$ 。因此系统故障时,就可避免对电

流差动控制器回路的干扰。

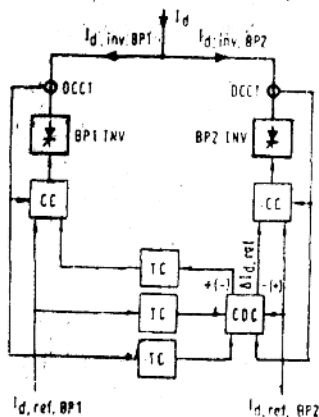


图2 电流差动控制回路图

图中：CC——电流控制器
CDC——电流差动控制器
DCC1——直流电流互感器
TC——电信传输装置
 I_d ——直流电流，其下标为：
BP1 (2)——双极1 (2)
inv——逆变器 ref——基准值

虽然双极1，双极2的逆变器位置相同，但电信传输装置用 $I_{d, ref, BP1}$, $I_{d, inv, BP1}$ 和 $\Delta I_{d, ref, BP1}$ 信号，可防止再次增加双极1和双极2控制器之间电位突变的问题。此外，电信传输装置对双极2和双极3并列运行来说是必不可少的，因为双极3的逆变器安装地点与双极2的逆变器的安装地点相距大约20—30公里。若电流差动控制器的回路反应理想（整定时间300—400毫秒）则每次电信延迟20毫秒，不会引起任何问题。

2、变压器抽头切换开关控制

两种双极一般都有变压器抽头切换开关控制。整流器抽头切换开关把点弧角大约控制在 $16^\circ \pm 3^\circ$ 的规定极限内，并把整流器变压器的二次电压限制在规定值之内。当逆变器为消弧角控制方式时，逆变器抽头切换开关将送电端的直流线路电压维持在额定电压，即双极1为463.5千伏和双极2为500千

伏。在电流控制方式中，逆变器的抽头切换开关不容许消弧角大于 23° 。

并列运行时，在双极2的逆变器抽头切换开关控制中，送电端的直流线路电压基准值由500千伏减到463.5千伏。这样，双极2并联逆变器的变压器抽头切换开关就自动地使双极2的电压适应于双极1的稳态电压。在并列时，双极2并列系统电极的电压通过一台与双极2整流器电流控制器并列运行的电子电压控制器由500千伏降到463.5千伏。在并列运行时该电压控制器仍继续工作。

3、过电流保护装置

输电线的任务是连续传输3600安电流。因此，个别并列高压直流输电系统电极的稳态电流等级限制到1800安，而瞬态电流也限在1800安。

如果2个并列系统电极都以 $p \cdot u \cdot \square$ 1800安电流运行，而且电流差动控制回路发生故障，则并列逆变器中的某一逆变器就可能得到 $0.1p \cdot u$ 过负荷。为了避免这一点，当电流差动控制回路发生故障时，例如信号 $I_{d, ref, BP1}$, $I_{d, inv, BP1}$ 和 $\Delta I_{d, ref, BP1}$ 发生电信故障或控制器电路发生故障时，可将并列系统电极的电流等级极限制至 $0.9p \cdot u$ 。

如果逆变器中，直流电流超过 $1.2p \cdot u$ 的时间约为120毫秒的话，则就开始解列故障，逆变器所属的高压直流输电系统电极就停止运行。

整流器阀的过电流保护装置不可能发生问题，因此不予讨论。逆变器阀过电流保护装置的基本问题在于：只有一个并列逆变器发生换向故障的情况下，必须耐受来自两个整流器的电流。

为了避免这一情况，一个办法就是迫使无故障的逆变器暂时变为整流器运行（ $\alpha = 60^\circ$ ），这样就可使其电流相应于基准值。但对于纳尔逊河高压直流输电双极1和双极2并列运行来说，这个方法只能部分使

用, 双极 1 的汞弧阀在 $\alpha = 90^\circ$ 范围内, 特别是低电流时, 显示出一种不断趋向逆弧的趋势。双极 2 采用可控硅阀没有发生这样的问题。因此, 为了减轻双极 1 的并列逆变器, 可以使用双极 2 的逆变器, 但反之却无增加逆弧的风险。所以对于逆变器过电流保护装置确定不采用这种方法, 而是采用下面介绍的另一些方法。

(1) 压敏限流器

当直流线路电压在 60 毫秒内下降到 $0.45 p \cdot u$ 以下时 (逆变器为 $0.3 p \cdot u$), 双极 2 的压敏限流器可把电流等级极限值减少到整流器的 $0.3 p \cdot u$ (逆变器为零)。双极 1 除了现有的限流器以外, 还安装类似的压敏限流装置, 这样当直流线路的电压降到 $0.1 p \cdot u$ 以下时, 就可将电流的基准值限制到 $0.3 p \cdot u$ 。双极 1 新的压敏限流器只在并行运行时起动。其直流跳闸电压阀与双极 2 的相同。但是, 它们不是减少电流等级极限, 而是引入一种强制延迟 ($\alpha = \alpha_{\text{min}} = 150^\circ$)。跳闸等候时间为 60 毫秒。如果有必要的话, 该等候时间可减少到 30 毫秒。这样, 在逆变器换向失灵时, 由两台整流器供应的总电流在 80 毫秒时间内限制到 $0.3 p \cdot u$ 。因为逆变器各阀在不变换向时能连续承载 $0.3 p \cdot u$ 的电流。

如果命令 $I_{d, \text{ref}} = 0 / FR$ 是在变电站电极局部产生的, 或是由其他变电站各电极借助于电信来的话, 那么变电站电极的压敏限流器就不能适用 (见下所述)。但消取命令 $I_{d, \text{ref}} = 0 / FR$, 约 85 毫秒后, 压敏限流器即可恢复操作。

(2) 强压延迟信号 $I_{d, \text{ref}} = 0$ 、 $I_{d, \text{ref}} = 0.3$ 的交换,

FR , $I_{d, \text{ref}} = 0$ 和 $I_{d, \text{ref}} = 0.3 pu$ 信号交换电路图见图 3。电信延迟时间为 30 毫秒。这样一来, 冗余的电路是为双极 1 逆变器过电流保护建立的。在变电站内部故障

情况下 (故障位于变流器变压器与直流电抗器之间), 也可采用命令 $I_{d, \text{ref}} = 0 / FR$, 根据输出电流来停止整流器运行。

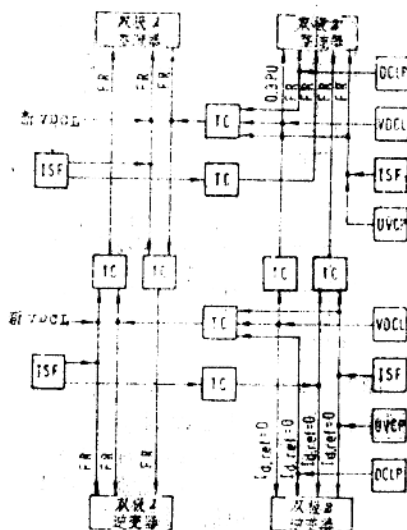


图3 $I_{d, \text{ref}} = 0$ $I_{d, \text{ref}} = 0.3 pu$, 强迫延迟信号的交换

DCLP——直流线路保护装置
FR——强迫延迟
ISF——变电站内部故障
TC——电信传输装置
UVCP——低电压控制程序
VDCL——压敏限流装置
 $I_{d, \text{ref}}$ ——电流基准值

4、直流线路保护装置

在并列运行时, 双极 1 并列系统电极的直流系统保护不适用。所以, 双极 1 和双极 2 的直流线路保护装置之间没有必要进行协调。当直流线路发生故障时, 双极 1 并列系统电极, 通过其新的压敏限流器强迫延迟, 或 (和) 由来自双极 2 并列系统电极的命令强迫延迟。重新启动由双极 2 的自动重新启动装置进行。如重新启动成功, 则双极 1 并列系统就在直流线路出现电压 60 毫秒后, 重新启动 (整流器取消强迫延迟)。因为直流线路故障在第一次重新启动时已经排除, 因此, 我们得到下面的定时 (见图 8)。