500 kV同塔双回线路接地开关的选择研究

以山东某电厂500 kV同塔双回出线为依托，建立特高压同塔双回输电线路电磁暂态仿真计算模型，计算线路感应电压和感应电流，从而进行接地开关的选择。分析了线路长度、线路潮流、导线换位方式和并联电抗器对感应电压及感应电流的影响效果，为工程设计和运行提供参考。

袁　野　王　丽／国核电力规划设计研究院

袁　野／高级工程师

关键词／Keywords
同塔双回线路·
接地开关·
感应电压·
感应电流·

随着电压等级的提高、系统输送潮流功率的大幅增加，同塔双回线路因具有节省输电走廊、经济价值高和运行维护简单等优势而逐渐成为电力传输的主要方式。然而同塔双回线路使得导线间耦合系数增大，导线与导线之间、导线与大地之间均存在较强的电磁耦合和静电耦合。因此，当I回线路停运，II回线路运行时，在停运线路上会产生较高幅值的感应电压和感应电流。对于500 kV同塔双回线路，其感应电压甚至会高达几十千伏，直接影响线路的检修和运行。

本文以山东某电厂500 kV同塔双回出线为依托，根据该线路实际结构和运行情况，建立特高压同塔双回输电线路电磁暂态仿真计算模型，计算同塔双回线路的感应电压和感应电流，并分析了线路长度、线路潮流、导线换位方式和并联电抗器对感应电压及感应电流的影响效果。研究成果可直接应用于电力系统设计，对线路建设、运行和设备检修提供借鉴。

感应电压和感应电流

对于同塔双回线路I和线路II，两回线路之间电流、电压与耦合矩阵之间的关系如下[1]。

电磁耦合为

$$\mathrm{j}\omega\begin{pmatrix} \boldsymbol{L}_{\mathrm{I}} & \boldsymbol{L}_{\mathrm{m}} \\ \boldsymbol{L}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{L}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \boldsymbol{I}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{I}} \\ \Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}}$分别为线路I和线路II的自电感矩阵；$\boldsymbol{L}_{\mathrm{m}}$为线路间的互电感矩阵；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{II}}$分别为两回线路上的电流；$\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{I}}$、$\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}$分别为两回线路上的电压降矩阵。

静电耦合为

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{C}_{\mathrm{I}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \boldsymbol{U}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \boldsymbol{Q}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中，$\boldsymbol{C}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{II}}$分别为线路I和线路II的自电容矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}$为线路间的互电容矩阵；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}$分别为两回线路上的电压矩阵；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{II}}$分别为两回线路上的感应电荷矩阵。

考虑到$\begin{pmatrix} \boldsymbol{Q}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}=\frac{1}{\mathrm{j}\omega}\begin{pmatrix} \boldsymbol{I}'_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{I}'_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}$，其中$\boldsymbol{I}'_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{I}'_{\mathrm{II}}$分别为两回线路的容性电流矩阵，代入得

$$\mathrm{j}\omega\begin{pmatrix} \boldsymbol{C}_{\mathrm{I}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \boldsymbol{U}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \boldsymbol{I}'_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{I}'_{\mathrm{II}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

依据上述方程可以对同塔双回线路的不同运行状态进行分析[2]。为了简化分析，假定同塔双回线路全长杆塔模型不变。

1）工况一。线路I正常运行，线路II停运且两端悬空。工况一下，容性感应电流为0，静电耦合使得线路II上产生容性感应电压，显然此时$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{II}}=0$，代入式（2）得此时线路II上感应的容性电压为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}=-\boldsymbol{C}_{\mathrm{II}}^{-1}\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{I}} \quad (4)$$

$\boldsymbol{C}_{\mathrm{II}}$与线路II总长度成正比，$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}$与线路II同塔双回段长度成正比[3]，因此，容性感应电压近似与被感应线路同塔

中国知网 https://www.cnki.net

双回段占总长度的比例成正比。若全长均为同塔双回，则容性感应电压与输电线路电压等级成正比，与线路长度、输电功率无关。

2）工况二。线路I正常运行，线路II停运且一端接地。工况二下对于感性感应电流无通路，接地侧流过电流为容性感应电流。将接地端$\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}=0$代入式（3）得线路II上感应的容性电流

$$\boldsymbol{I}'_{\mathrm{II}}=\mathrm{j}\omega\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{I}} \tag{5}$$

可见，容性感应电流近似与被感应线路同塔双回段长度成正比。

由于线路II一端接地，线路容性感应电压为零，但存在感性感应电压$\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}$。将悬空$\boldsymbol{I}_{\mathrm{II}}=0$代入式（1）得线路II上感应的感性电压

$$\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}=\mathrm{j}\omega\boldsymbol{L}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}} \tag{6}$$

可见，感性感应电压近似与被感应线路同塔双回段长度成正比，与运行线路的电流成正比。

3）工况三。线路I正常运行，线路II停运且两端接地。工况三下电磁耦合感应出感性感应电流，由于线路II两端接地，则$\Delta\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}=0$，代入式（1）得

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{II}}=-\boldsymbol{L}_{\mathrm{II}}^{-1}\boldsymbol{L}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}} \tag{7}$$

可见，感性感应电流近似与被感应线路同塔双回段占总长度的比例成正比。若全长均为同塔双回，则感性感应电流与输电功率成正比。

同塔双回线路模型

依托电厂一期为2×1 039 MW，线路为同塔双回500 kV电压等级的输电线路，总长45.325 km。导线型号为JL/LB20A－630/45，4分裂，分裂间距500 mm。地线为OPGW架空复合光缆OPGW－24B1－130/155。全线主要的杆塔模型如图1所示，单位为mm。全线逆相序排列，无换位。

仿真计算

根据同塔双回线路模型，在EMTP上进行仿真计算。

1. 正常工况

根据系统要求，线路I运行时带最大负荷2 100 MW，功率因数取0.9，线路II停运。

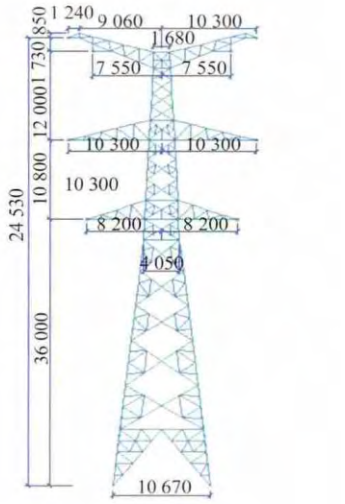

图1　杆塔模型

同塔双回线路常见的两种相序排列方式如图2所示，分别命名为正序和逆序。分别考察正相序和逆相序的情况，EMTP仿真计算结果如表1、表2所示。

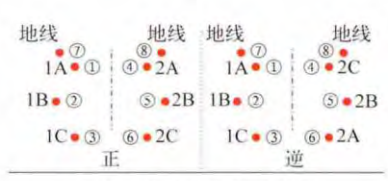

图2　正/逆相序示意图

表1　正相序感应电压和感应电流计算结果表

工况	项目	电厂侧			对侧		
		A	B	C	A	B	C
一	电压/kV	23.00	3.15	25.40	20.71	2.41	22.08
	电流/A						
二	电压/kV	2.51	0.91	3.54			
	电流/A				4.38	0.12	4.01
三	电压/kV						
	电流/A	213.17	23.16	233.66	217.64	23.26	237.50

表2　逆相序感应电压和感应电流计算结果表

工况	项目	电厂侧			对侧		
		A	B	C	A	B	C
一	电压/kV	26.79	3.34	25.18	23.37	2.86	23.02
	电流/A						
二	电压/kV	3.44	0.92	2.21			
	电流/A				4.26	0.13	4.77
三	电压/kV						
	电流/A	224.39	29.38	199.86	228.76	29.32	204.81

中国知网 https://www.cnki.net

从表1和表2可见，A相和C相的感应电压和感应电流大致相等，远大于B相的仿真结果，应取A相与C相中较大的一相进行考察。对于正相序与逆相序来说，只是A相与C相的对换。当A相与C相导线参数相同的情况下，所得计算结果也是相似的，仅表现为A相与C相结果的对换。

根据IEC标准制定的GB 1985—2004，500 kV接地开关额定感应电流和感应电压的标准值如表3所示。

表3 500 kV接地开关额定感应电流和感应电压（有效值）

A类接地开关	电磁耦合	额定感应电流/A	80
		额定感应电压/kV	2
	静电耦合	额定感应电流/A	1.6
		额定感应电压/kV	8
B类接地开关	电磁耦合	额定感应电流/A	200
		额定感应电压/kV	25
	静电耦合	额定感应电流/A	25
		额定感应电压/kV	25

根据仿真计算结果可以看出，工况一下的静电感应电压和工况三下的电磁感应电流均超过了IEC标准给出的B类接地开关的标准值。参照IEC标准选择的B类接地开关不能满足该电厂500 kV同塔双回出线的要求，需要通过上面的仿真计算结果提出接地开关参数的设计要求。

2. 线路长度的影响

针对该电厂同塔双回出线模型进行仿真计算，得到不同长度时停运线路上的感应电压和感应电流如表4所示。

电磁感应电流和静电感应电压随线路的增加变化不大，仍超过IEC标准给出的B类接地开关的标准值。

电磁感应电压和静电感应电流随线路长度的增加而显著增加，基本成正比例关系。可以推导出当线路长度达到450 km时，电磁感应电压将超标；当线路长度达到250 km时，静电感应电流将超标。

3. 线路潮流的影响

针对该电厂同塔双回出线模型进行仿真计算，得到不同输送功率下停运线路上的感应电压和感应电流如表5所示。

表4 感应电压和感应电流与线路长度的关系

线路长度/km	电磁感应电流/A			电磁感应电压/kV			静电感应电流/A			静电感应电压/kV		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
60	217.79	26.38	234.00	3.27	1.63	4.24	5.17	1.66	6.13	22.56	3.48	28.44
45.325	213.17	23.16	233.66	2.51	0.91	3.54	4.38	0.12	4.01	23.00	3.15	25.40
35	209.52	29.06	227.31	1.88	0.96	2.71	3.65	0.69	3.44	23.86	1.65	26.41
20	223.13	23.98	246.09	1.13	0.46	1.67	2.03	0.09	1.89	22.61	2.46	25.22

表5 感应电压和感应电流与线路潮流的关系

线路潮流/MW	电磁感应电流/A			电磁感应电压/kV			静电感应电流/A			静电感应电压/kV		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2100	213.17	23.16	233.66	2.51	0.91	3.54	4.38	0.12	4.01	23.00	3.15	25.40
1 728.59	151.04	23.22	170.64	1.63	0.72	2.65	4.87	0.12	4.37	25.10	3.28	26.64
1 151.03	100.40	16.44	114.74	1.04	0.52	1.81	4.98	0.11	4.49	25.04	3.22	26.49
551.66	47.84	8.96	56.61	0.45	0.30	0.93	5.08	0.09	4.61	24.97	3.16	26.33

可见，电磁感应电压和电磁感应电流随潮流的减小而显著减小，基本成正比例关系。这与前面的推导一致。进一步推导表明，要使得电磁感应电流满足IEC标准给出的B类接地开关的标准值，线路输送功率临界值为1 950 MW左右。

静电感应电流和静电感应电压随潮流的减少变化不大；降低输送功率后，静电感应电压仍超标。

中国知网 https://www.cnki.net

4. 换位方式的影响

工程设计中，根据电气不平衡度的要求，对于超过一定长度的线路通常需要进行合理换位。换位后达到首端和末端相序一致，每种相序排列各占1/3线路长度，称为一个全换位。图3为4种导线换位方式。不同换位方式下停运线路上的感应电压和感应电流如表6所示

从表6计算结果可见，在4种换位方式下，输电线路A、B和C三相的电磁感应电流、电磁感应电压、静电感应电流和静电感应电压的数值相差不大，比较平衡；而不换位方式下，三相的感应参数值相差较大。

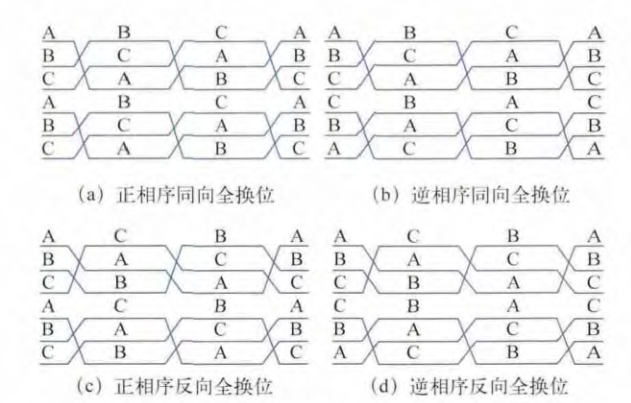

图3 导线换位示意图

表6 不同换位下的感应电压和感应电流

换位方式	电磁感应电流/A			电磁感应电压/kV			静电感应电流/A			静电感应电压/kV		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
不换位	213.17	23.16	233.66	2.51	0.91	3.54	4.38	0.12	4.01	23.00	3.15	25.40
正同	150.92	151.72	152.51	1.71	1.73	1.74	2.83	2.81	2.75	15.02	14.89	14.57
逆同	152.50	151.72	150.92	1.74	1.73	1.71	2.75	2.81	2.83	14.57	14.89	15.02
正反	129.80	129.30	129.05	1.47	1.47	1.48	2.05	2.13	2.08	11.09	11.43	11.14
逆反	129.05	129.30	129.80	1.48	1.47	1.47	2.08	2.13	2.05	11.14	11.42	11.09

4种换位方式下，三相的感应参数最大值均小于不换位的情况。可见，换位能够在一定程序上改善线路的感应电压和感应电流。同向全换位方式下，电磁感应电流降低到152 A，静电感应电压降低到15 kV；反向全换位方式下，电磁感应电流降低到129 A，静电感应电压降低到11 kV。此时，B类接地开关能够满足该500 kV同塔双回出线的要求。

反向换位的感应参数值小于同向换位值，反向换位效果更好。对于正相序与逆相序来说，只是A相与C相的对换；当A相与C相导线参数相同的情况下，所得计算结果也是相似的，仅表现为A相与C相结果的对换。

5. 高压并联电抗器的影响

当检修线路首末端具有并联电抗器时，并联电抗器能补偿线路对地电容量，从而对检修线路的感应电压和感应电流产生不同程度的影响。由于并联电抗器的补偿，对地电容量减小，运行线路对检修线路上的静电感应显著增加。针对该电厂同塔双回出线模型进行仿真计算，不同补偿度下停运线路上的感应电压和感应电流如表7所示。

表7 不同补偿度下的感应电压和感应电流

换位方式	电磁感应电流/A			电磁感应电压/kA			静电感应电流/A			静电感应电压/kA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
无补偿	213.17	23.16	233.66	2.51	0.91	3.54	4.38	0.12	4.01	23.00	3.15	25.40
电厂侧60%	213.17	23.16	233.66	2.50	0.90	3.51	5.18	0.29	5.20	33.98	3.65	27.96
电厂侧80%	213.17	23.16	233.66	2.50	0.90	3.52	4.97	0.23	4.91	87.94	21.15	61.85
电厂侧100%	213.17	23.16	233.66	2.50	0.90	3.52	4.85	0.19	4.73	361.55	144.48	393.42
电厂侧120%	213.17	23.16	233.66	2.50	0.90	3.52	4.77	0.16	4.61	210.60	66.47	154.73
电厂侧140%	213.17	23.16	233.66	2.50	0.90	3.53	4.72	0.15	4.52	117.06	62.51	59.33

中国知网 https://www.cnki.net

由表7可见，线路高抗对于电磁感应电流、电磁感应电压和静电感应电流的影响都很小，但对于静电感应电压的影响很大。随着补偿度的升高，容性电压先增大再减小，在100%附近感应出了非常高的静电感应电压。因此，对装设线路高抗的同塔双回线路，应尽量避免工况一的运行方式。

结束语

本文以山东某电厂500 kV同塔双回出线为例，进行了感应电压和感应电流的计算，并分析了影响感应电压和感应电流的因素，得到如下结论。

1）电磁感应电压和静电感应电流随线路长度的增加而显著增加，基本成正比例关系。合理选择送电路径，有利于控制电磁感应电压和静电感应电流的大小。

2）电磁感应电压和电磁感应电流随潮流的减小而显著减小，基本成正比例关系。本线路单回运行时，若输送功率控制在1 950 MW以下，则电磁感应电流满足IEC标准给出的B类接地开关的标准值。

3）采取合理的换位方式可以在一定程度上减小感应电压和感应电流，并且使得各相感应参数值平衡。

4）线路高抗对静电感应电压的影响很大。对装设线路高抗的同塔双回线路，应尽量避免工况一的运行方式。

参考文献

[1] 施围，郭洁．电力系统过电压计算 [M]．北京：高等教育出版社，2006．

[2] 王亮，王辉，冯任卿，等．同塔双回线路感应电流与感应电压的研究 [J]．沈阳工程学院学报（自然科学版），2010，6（3）．

[3] 纪雯．电力系统设计手册 [M]．北京：中国电力出版社，1998．

（收稿日期：2014－04－11）EA

(上接第111页)

径向固定，使电热带紧贴管道，提高伴热效率。恒功率电热带安装时不允许交叉、重叠，以避免过热，影响使用寿命。

3）安装MI加热电缆和并联带时，应注意“冷端”位置，确保发热段控制在需伴热的部位，冷端引线通过保温层引出时应加以保护。

2. 电伴热运行维护

电伴热安装完成以后，应对每根电伴热带进行绝缘测试，电伴热带线芯与管道或容器间的电阻不得小于20 MΩ，检查无误后试送电2 h，检查发热情况和各种电气参数是否正常。试送电运行正常后，可进行保温层和防护层的施工，施工结束后，继续重复前面的绝缘检查，并连续送电24 h，检查各种参数正常后，方可正式投入运行。

电伴热正常投用后，需要定期检查运行情况，具体内容是：①用500 V摇表测量电伴热系统的绝缘电阻是否大于2 MΩ，若小于0.5 MΩ，说明系统有问题，应及时检查处理。②用钳形电流表测量电流，检查发热功率是否正常。③检查配电系统运行是否正常。④检查各防爆接线盒是否有损伤和残缺情况。

结束语

1,4-丁二醇项目的电伴热系统投运后，运行正常，伴热效果达到了预定温度，伴热温度控制稳定，完全能够满足工艺要求。与传统的蒸汽伴热相比较，消除了“跑冒滴漏”等现象，明显改善了企业的生产环境，提高了企业的经济效益。

参考文献

[1] 李金岭，李成响．电伴热在高芳烃油长输管线中的应用 [J]．电气应用，2013（23）：60-63．

[2] 王国树．电伴热在川气东送普光天然气净化厂液硫系统中的应用 [J]．电气应用，2010（22）：42-43．

（收稿日期：2014－06－24）EA

中国知网 https://www.cnki.net