交流线路对平行架设±500 kV 同塔双回直流的影响及措施研究

李 涛[1]，李新年[1]，蒋卫平[1]，高 健[2]

（1.中国电力科学研究院，北京 100192； 2.天津电力工程监理有限公司， 天津 300143）

摘要：根据三沪Ⅱ回±500 kV 同塔双回直流主回路参数和华东地区典型 500 kV 交流线路数据，采用 EMTDC 程序建立了交/直流输电系统的仿真模型。研究了交直流线路平行架设条件下，直流线路极导线布置和直流系统运行工况对交直流平行架设的影响，并给出了换流变阀侧直流偏磁电流的计算结果。对交/直流线路的平行长度，它们之间的接近距离以及抑制换流变压器阀侧直流偏磁电流的措施提出了建议。

关键词：平行架设交/直流线路；同塔双回直流；直流偏磁电流；直流系统电磁暂态

Influence of AC transmission lines on parallelly erected ±500 kV HVDC double circuit transmission lines and suppression measure

LI Tao[1]，LI Xin-nian[1]，JIANG Wei-ping[1], GAO Jian[2]
（1.China Electric Power Research Institute，Beijing 100192，China;
2.Tianjin Electric Power Engineering Supervision Co.Ltd, Tianjin 300143, China）

Abstract：According to the main circuit parameters of ±500 kV HVDC project from Three Gorges to Shanghai Ⅱ and the typical data of 500 kV AC transmission line in east of China，the model for simulation of AC/HVDC transmission lines is built by electro-magnetic transient in DC System（EMTDC）program．The effects of different conductor disposal schemes of DC lines and different HVDC operation modes on parallel AC/DC transmission lines are researched．The DC bias current at valve side of converter transformer is researched，and the corresponding calculation results are given．Several suggestions on the parallel length between AC and HVDC lines，their adjacent distance and the measure to suppress the DC bias current at valve side of converter transformer are put forward．

Key words：AC transmission line parallelly erected with DC transmission lines; double circuit HVDC; DC bias current; electro-magnetic transient in DC system

中图分类号： TM773 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)19-0070-06

0 引言

根据电网规划，三沪Ⅱ回直流输电工程拟采用±500 kV 同塔双回直流线路。迄今为止，关于双回同塔架设直流输电线路，在我国乃至世界尚无设计经验和运行经验。直流输电不同于交流输电，双回同塔架设直流输电线路设计更有其技术特点。

以往直流输电工程对交直流平行线路之间的相互影响作过相应研究，但随着社会经济的迅速发展，电网建设与土地资源的矛盾日趋严重，越来越多的线路要求合并在同一输电走廊内走线，使得交流线路对直流系统的影响问题更为突出。对本工程而言，线路所经湖北、安徽、浙江、上海均长距离平行各等级的交直流线路，如三沪直流线路、特高压交直流线路以及 500 kV 交流线路，平行架设长度达数百公里[1]，交流线路通过磁感应和电容耦合，将会在直流线路中产生一个叠加于直流电流之上的稳态工频电流。该电流通过换流器将会在换流变压器（简称换流变）的阀侧产生直流偏磁电流[1-12]，偏磁会导致换流变饱和，引起其损耗和噪声增大，情况严重时会对换流变承受偏磁的能力提出特殊的要求或采取必要的措施减小换流变阀侧直流偏磁电流。因此研究平行交直流线路之间的相互影响对工程有着极为现实的意义。

近年来，虽然进行过交/直流同廊道问题的研究，但直流系统大都为简化模型[7-9]，且采用等效电势法针对交流线路对直流的影响问题进行了研究，研究结果不够准确。文献[2-4]虽然采用直流详细模型，但是计算时没有考虑直流杆塔布置和直流运行工况的影响。本文采用电磁暂态程序（EMTDC 程序），建

立了平行架设的交/直流线路电磁耦合模型及特高压交/直流输电系统模型，计算了直流线路极导线布置和直流系统运行工况对交直流平行架设的影响，研究了减小换流变阀侧直流偏磁电流的措施。研究结果可为三沪Ⅱ回±500 kV同塔双回直流线路走廊的选择提供参考依据。

1　计算模型和系统条件

采用 EMTDC 程序建立交/直流输电系统仿真模型，详细模拟了交/直流线路参数、HVDC 换流器和换流变非线性饱和特性等。图 1 为交/直流线路平行架设的情况，三沪Ⅱ回±500 kV 直流线路全长 1 018 km，交/直流线路耦合段位于逆变侧。

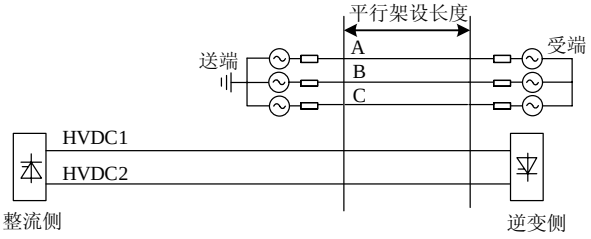


图 1 平行架设的交/直流线路

Fig.1 AC/DC parallel transmission system

表 1 ±500 kV 直流线路杆塔与导线和地线参数

Tab.1 Parameters of conductor and ground wire for ±500 kV DC line

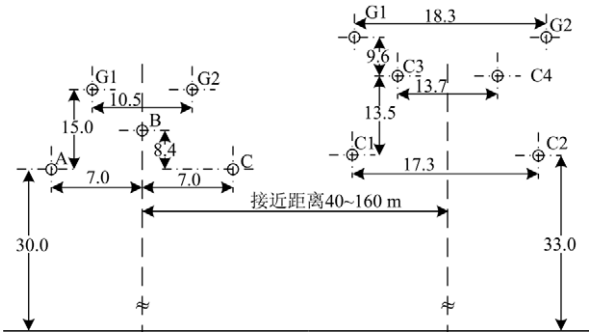
项　目	线　路	架空地线
导线型号	4×ACSR-720/50	GJ-80
导线外径/cm	3.623	1.14
直流电阻/（Ω/km）	0.039 84	1.566 7
分裂间距/cm	50	-
塔上悬挂高度/m	见图 2	46.5
弧垂/m	18	14
大地平均电阻率/（Ω·m）	100.0	

表 2 500 kV 交流线路单回线路杆塔与导、地线参数

Tab.2 Parameters conductor and ground wire for single circuit 500 kV AC line

项　目	线　路	架空地线
导线型号	4×LGJ500/35	JLB4-150
导线外径/cm	3.0	1.576
直流电阻/（Ω/km）	0.058 12	0.295
分裂间距/cm	45	-
塔上悬挂高度/m	见图 2	45
弧垂/m	15.0	10
大地平均电阻率/（Ω·m）	100.0	

系统基本条件：500 kV 交流线路输送功率 1 500 MW，直流系统双极输送功率 3 000 MW，模型中包括详细的交/直流滤波器，直流控制基于 CIGRE 模型；交/直流线路均采用频率相关模型[13]，杆塔布置和参数见表 1、2 和图 2。交/直流线路平行架设长度 $L_{\text{ac-to-dc}}$ 从 20 km 一直计算到 140 km，而交/直流线路接近距离 $D_{\text{ac-to-dc}}$ 从 40 m 开始一直计算到 160 m，接近距离为交/直流线路杆塔中心线间的距离（参见图 2）。



A，B，C—相导线；C1—正极；C2—负极；G—地线；

对地距离均为悬挂高度；大地平均电阻率 ρ=100 Ω·m

图 2 交/直流线路平行架设的杆塔布置

Fig.2 Tower geometry structure of UHVAC/HVDC transmission lines

2　交流线路正常运行时特高压直流线路上的工频感应分量

2.1 直流线路极导线布置对其工频感应分量的影响

对于同塔双回±500 kV 直流线路，如果极导线按上下两层布置，可能的极导线布置方案有 4 种，见图 3。在下面，将（a）、（b）、（c）和（d）布置方案分别记为（a）+−/−+、（b）−+/−+、（c）++/−−和（d）−−/++，斜杠上下分别表示上层和下层的左右极导线极性。

极导线采用（a）+−/−+方案布置时，可以将两回线路极导线水平布置在上、下层（上层为 HVDC2，下层为 HVDC1），或者垂直布置在左、右侧（左侧为 HVDC1，右侧为 HVDC2）；采用（b）−+/−+方案时，一般将两回线路极导线水平布置在上、下层；采用（c）++/−−和（d）−−/++方案时，一般将两回线路极导线垂直布置在左、右侧。

直流系统运行工况：整流站直流电压和电流为 500 kV、3 007 A，逆变站直流电压和电流为 467 kV、2 986 A，整流站触发角 15.2°，逆变站关断角 17.2°，直流双极输送功率 3 000 MW。

同廊道 500 kV 交流系统运行工况：送端电源电

压 530 kV，初相角 55.0°；受端电源电势为 520 kV，初相角 43.0°；500 kV 交流线路单回输送功率 1 500 MW，双回输送 3 000 MW。

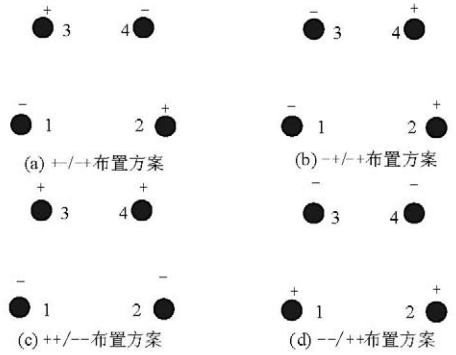


图 3 同塔双回±500 kV 直流线路极导线布置方案示意图

Fig.3 Conductor disposal schemes of ±500 kV double circuit DC lines

表 3～表 7 给出了双回直流不同极导线布置方式下直流线路工频感应电压电流的计算结果。表中：E 为纵向感应电动势峰值，U_{dcr_50} 和 I_{dcr_50} 为整流站直流阀侧工频感应电压和电流，U_{dci_50} 和 I_{dci_50} 为逆变站直流阀侧工频感应电压和电流。研究结果表明，各种布置方式中均是在位置 1 的极导线（下层极导线且靠近交流线路侧）上产生的工频感应电流分量最大，而且几种杆塔布置方式下其感应的工频感应电流峰值均为 7.8 A 左右，纵向电动势约为 4.2 kV。对于直流线路上感应的纵向电动势幅值，几种极导线布置方式均为位置 1>位置 3>位置 2>位置 4。因此，从交流线路对直流线路感应的工频感应分量上看，几种直流极导线布置基本相当。

表 3 a 方案水平布置下直流线路工频感应分量的计算结果

Tab.3 Induced component of DC lines under a disposal scheme (horizontal configuration)

项次		E/kV	整流站		逆变站	
极导线位置	直流回数		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
1	HVDC1P2	4.24	0.69	7.79	0.05	0.63
2	HVDC1P1	3.34	0.58	5.17	0.07	1.34
3	HVDC2P1	3.66	0.88	4.86	0.43	0.44
4	HVDC2P2	3.13	0.79	3.63	0.49	1.46

注 1：极导线下层左侧为位置 1，右侧为位置 2；极导线上层左侧为位置 3，右侧为位置 4。

注 2：HVDC1P1 为直流系统 1 极 1，HVDC1P2 为直流系统 1 极 2，HVDC2P1 为直流系统 2 极 1，HVDC2P2 为直流系统 2 极 2。以下同。

表 4 a 方案垂直布置下各回直流工频感应分量的计算结果

Tab.4 Induced component of DC lines under a disposal scheme (vertical configuration)

项次		E/kV	整流站		逆变站	
极导线位置	直流回数		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
1	HVDC1P2	4.23	0.64	7.86	0.03	0.50
2	HVDC2P1	3.32	0.91	5.14	0.56	2.31
3	HVDC1P1	3.65	0.77	5.38	0.07	0.77
4	HVDC2P2	3.11	0.89	3.42	0.58	2.12

表 5 b 方案水平布置下各回直流工频感应分量的计算结果

Tab.5 Induced component of DC lines under b disposal scheme (horizontal configuration)

项次		E/kV	整流站		逆变站	
极导线位置	直流回数		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
1	HVDC1P2	4.23	0.70	7.79	0.04	0.59
2	HVDC1P1	3.34	0.54	5.08	0.05	1.29
3	HVDC2P2	3.66	0.86	4.72	0.20	0.59
4	HVDC2P1	3.13	0.76	3.50	0.20	1.27

表 6 c 方案垂直布置下各回直流工频感应分量的计算结果

Tab.6 Induced component of DC lines under c disposal scheme (vertical configuration)

项次		E/kV	整流站		逆变站	
极导线位置	直流回数		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
1	HVDC1P2	4.23	0.65	7.87	0.02	0.52
2	HVDC2P2	3.32	0.86	5.19	0.61	2.48
3	HVDC1P1	3.65	0.62	5.41	0.07	0.70
4	HVDC2P1	3.10	0.84	3.32	0.55	1.98

表 7 d 方案垂直布置下各回直流工频感应分量的计算结果

Tab.7 Induced component of DC lines under d disposal scheme (vertical configuration)

项次		E/kV	整流站		逆变站	
极导线位置	直流回数		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
1	HVDC1P1	4.23	0.64	7.93	0.07	0.54
2	HVDC2P1	3.32	0.83	5.11	0.55	2.28
3	HVDC1P2	3.65	0.59	5.24	0.03	0.73
4	HVDC2P2	3.10	0.84	3.39	0.58	2.14

2.2 直流系统不同运行方式下直流线路工频感应分量计算

交直流线路同廊道架设，交流线路通过与直流线路的感性和容性耦合，在直流每极线路上产生纵向感应电势及工频对地电压，进而产生工频电流分量。由于直流系统运行方式不同，导致交直流线路间的相互耦合和工频感应分量流通的回路发生变化，为了解和掌握直流极导线上可能产生的最大工频感应分量，针对直流不同运行方式进行了详细研

究计算。±500 kV 同塔双回直流线路导线布置及线路走廊宽度优化设计的研究推荐采用 b）杆塔布置方式[14]，所以研究中主要研究了这种杆塔布置。

表 8~表 11 给出了 b)方案极导线水平布置条件下不同直流运行方式的计算结果。从表中数据可以看出，直流各种运行方式中，在 HVDC2 停运情况下 HVDC1 极 2 大地回线运行时其整流站直流阀侧产生的工频感应电流最大，为 11 A。由于换流变阀侧直流偏磁电流的数值直接由直流阀侧工频感应电流的幅值决定，所以在换流变阀侧产生的直流偏磁电流也大于其他运行方式，即该运行方式下工频感应分量对直流影响最大。本次研究主要在上述直流运行方式最严重工况下进行研究。

表 8 不同运行方式下工频感应分量的计算结果

Tab.8 Induced component of DC lines under different HVDC operation modes

直流运行工况		E/kV	HVDC1 极 1 整流站		HVDC1 极 1 逆变站	
HVDC1	HVDC2		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
BP	BP	3.34	0.54	5.08	0.05	1.29
BP	P2MR	3.31	0.59	5.52	0.18	3.01
BP	P2GR	3.33	0.60	5.89	0.09	1.85
BP	停运	3.34	0.71	6.83	0.07	1.57
P2MR	BP	3.04	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	P2MR	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	P2GR	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	停运	2.92	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	BP	3.32	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	P2MR	3.21	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	P2GR	3.30	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	停运	3.32	0.00	0.00	0.00	0.00

注：表中 BP 为双极运行方式，MR 为金属回线运行，GR 为大地回线运行，P2 为极 2 ，停运为直流双极停运，下同。

表 9 不同运行方式下工频感应分量的计算结果

Tab.9 Induced component of DC lines under different HVDC operation modes

直流运行工况		E/kV	HVDC1 极 2 整流站		HVDC1 极 2 逆变站	
HVDC1	HVDC2		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
BP	BP	4.23	0.70	7.79	0.04	0.59
BP	P2MR	4.21	0.75	8.19	0.13	1.30
BP	P2GR	4.23	0.75	8.13	0.06	0.62
BP	停运	4.23	0.85	9.52	0.07	0.84
P2MR	BP	4.00	1.99	5.31	0.49	6.47
P2MR	P2MR	3.95	2.03	5.83	0.36	5.12
P2MR	P2GR	3.96	2.15	5.56	0.49	6.64
P2MR	停运	3.90	2.47	6.50	0.50	6.84
P2GR	BP	4.20	0.52	8.53	0.07	1.57
P2GR	P2MR	4.16	0.53	8.69	0.06	1.01
P2GR	P2GR	4.19	0.51	9.09	0.07	1.40
P2GR	停运	4.19	0.64	11.01	0.12	2.06

表 10 不同运行方式下工频感应分量的计算结果

Tab.10 Induced component of DC lines under different HVDC operation modes

直流运行工况		E/kV	HVDC2 极 1 整流站		HVDC2 极 1 逆变站	
HVDC1	HVDC2		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
BP	BP	3.13	0.76	3.50	0.20	1.27
BP	P2MR	2.95	1.54	0.00	0.23	0.00
BP	P2GR	3.11	0.00	0.00	0.00	0.00
BP	停运	3.13	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	BP	3.06	0.92	4.57	1.20	4.07
P2MR	P2MR	2.89	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	P2GR	2.96	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	停运	2.91	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	BP	3.13	0.94	4.63	0.36	1.98
P2GR	P2MR	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	P2GR	3.09	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	停运	3.12	0.00	0.00	0.00	0.00

表 11 不同运行方式下工频感应分量的计算结果

Tab.11 Induced component of DC lines under different HVDC operation modes

直流运行工况		E/kV	HVDC2 极 2 整流站		HVDC2 极 2 逆变站	
HVDC1	HVDC2		U_{dcr_50}/kV	I_{dcr_50}/A	U_{dci_50}/kV	I_{dci_50}/A
BP	BP	3.66	0.86	4.72	0.20	0.59
BP	P2MR	3.51	1.12	2.98	0.73	4.13
BP	P2GR	3.63	0.47	5.52	0.13	1.31
BP	停运	3.68	0.00	0.00	0.00	0.00
P2MR	BP	3.60	1.08	5.58	0.88	2.76
P2MR	P2MR	3.45	1.30	3.60	0.29	1.69
P2MR	P2GR	3.57	0.48	5.65	0.30	2.69
P2MR	停运	3.48	0.00	0.00	0.00	0.00
P2GR	BP	3.65	1.02	5.17	0.35	0.93
P2GR	P2MR	3.47	1.23	3.17	0.78	4.43
P2GR	P2GR	3.62	0.50	6.29	0.11	1.09
P2GR	停运	3.67	0.00	0.00	0.00	0.00

3　换流变阀侧直流偏磁电流的计算

500 kV 同塔双回交流线路与±500 kV 直流线路平行架设时，不同平行长度和接近距离下换流变阀侧直流偏磁电流的最大值计算结果如表 12 所示（考虑了直流控制器的调节作用）。根据荆门－上海±500 kV 直流工程换流变压器规范书的要求，换流

变网侧单相可长期承受的直流偏磁电流不小于 10 A，其中触发角不平衡、换流器交流母线上的正序二次谐波电压以及单极大地回线方式运行时由于换流变中性点电位升高等因素产生的直流偏磁电流约为 5 A。因此，交直流线路平行架设在换流变网侧产生的直流偏磁电流不应大于 5 A，考虑留有一定的裕度，可按不超过 4 A 控制，这样折算到换流变阀侧约为 10 A。换流变阀侧直流偏磁电流超出规范要求的数据在表 12 中用加粗字体标出。

从表 12 中数据可见，500 kV 交流线路与直流线路平行架设，若未采取交流线路换位及其它措施，在平行长度大于 80 km、接近距离 40 m 的情况下，换流变阀侧的直流偏磁电流最大值为 12.35 A，超过规范要求。随着线路平行长度的增加，阀侧直流偏磁电流基本按线性增加。当交直流线路平行长度大于 80 km，平行长度每增加 20 km，要控制换流变阀侧直流偏磁电流在允许范围内，交直流线路接近距离约需要增加 10 m。此外，根据研究结果，换流变阀侧直流偏磁电流与交流线路输送功率基本呈线性关系，如实际工程中交流线路的输送功率与本文的研究不同，可按比例进行折算。

表 12 换流变阀侧直流偏磁电流最大值的计算结果

Tab.12 The calculation result of max value of DC bias current of converter transformer at valve side in inverter station

接近距离/m	直流偏磁电流/A						
	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 20 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 40 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 60 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 80 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 100 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 120 km	$L_{ac\text{-}to\text{-}dc}$= 140 km
40	3.27	6.32	9.07	**12.35**	**15.37**	**18.30**	**21.21**
50	2.55	4.83	7.12	9.37	**11.63**	**13.81**	**15.96**
60	1.97	3.69	5.39	7.06	8.84	**10.34**	**11.97**
70	1.65	3.08	4.47	5.86	7.26	8.57	9.88
80	1.55	2.88	4.17	5.45	6.72	7.98	9.17
90	1.44	2.63	3.83	5.00	6.15	7.30	8.40
100	1.35	2.43	3.54	4.62	5.69	6.71	7.75
120	1.17	2.09	3.03	3.93	4.84	5.73	6.60
140	1.05	1.85	2.69	3.48	4.29	5.06	5.82
160	0.95	1.66	2.39	3.10	3.80	4.49	5.17

根据研究结果，在换流变直流偏磁电流满足上述规范要求的情况下，直流线路上感应的工频电压和电流最大峰值分别在 3 kV、15 A 以下，直流系统能够正常运行，对直流线路和换流站设备的绝缘影响也很小。因此，换流变能够承受的最大直流偏磁电流是制约交/直流线路平行架设长度和接近距离的主要因素。

4 限制措施

在线路走廊受限的情况下，针对减小或抑制由交/直流线路平行架设产生的换流变阀侧直流偏磁电流，建议采取以下措施：①交流线路换位；②直流中性母线装设调频到工频的 LC 阻波器。

（1）交流线路换位。

①120 km 的交流线路分为 60 km+60 km 2 段，采用 abc-cab 换位方式；②120 km 的交流线路分为 40 km+40 km+40 km 3 段，采用 abc-cab-bca 换位方式。表 13 中 I_{rdc} 和 I_{idc} 分别为整流站和逆变站换流变阀侧直流偏磁电流最大值，以下同。

表 13 交流线路换位时直流线路工频感应分量及换流变阀侧偏磁电流计算结果

Tab.13 Calculation results of induced component and DC bias current under AC line transposition

项次	整流侧				逆变侧		
交流平行线路部分及其换位线段长度/km	E/kV	$U_{dr\text{-}50}$/kV	$I_{dr\text{-}50}$/A	I_{rdc}/A	$U_{di\text{-}50}$/kV	$I_{di\text{-}50}$/A	I_{idc}/A
120	4.91	1.70	11.43	10.34	0.38	2.28	1.88
60+60	2.64	0.91	6.21	5.57	0.20	1.21	0.99
40+40+40	0.14	0.05	0.42	0.36	0.10	0.58	0.48

由表 13 中计算结果可以看出，交流线路与直流线路平行部分在中点换位后，直流线路上感应的工频电压、电流和换流变阀侧直流偏磁电流减小为不换位时的 50%左右；如平行部分交流线路采用全换位，在直流线路上工频感应电压、电流峰值和换流变阀侧直流偏磁电流可减小到较低的水平。

（2）直流中性母线加装工频阻波器。

对于三沪Ⅱ回±500 kV 直流输电工程，可以在整流和逆变站中性母线安装一台 75 mH 电抗器及相应阻波元件来构成 LC 并联工频阻波器（BF）[15]。

加装并联工频阻波器前后的计算结果见表 14，研究时平行架设的交流线路未换位。从表中研究结果可见，加装工频阻波器可有效抑制直流线路工频感应电流，并将换流变压器阀侧直流偏磁电流降到

表 14 加装工频阻波器时直流线路工频感应分量与换流变阀侧偏磁电流计算结果

Tab.14 Calculation results of induced component and DC bias current when power frequency blocking filters are applied at neutral line

平行线段长度/km	BF	E/kV	整流侧			逆变侧		
			$U_{dcr\text{-}50}$/kV	$I_{dcr\text{-}50}$/A	I_{rdc}/A	$U_{dci\text{-}50}$/kV	$I_{dci\text{-}50}$/A	I_{idc}/A
120	无	4.91	1.70	11.43	10.34	0.38	2.28	1.88
120	有	4.97	4.09	5.77	3.57	4.04	6.82	3.46

较低的水平；但加装工频阻波器后整流侧线路工频感应电压峰值会明显增加。本文仅从安装工频阻波器对减小换流变阀侧直流偏磁的角度进行了研究，如果工程采用上述方法，还需要按照实际情况进行设备绝缘配合等方面的研究。

5 结论

(1) 四种直流极导线布置方案下平行架设交流线路在直流线路上感应的纵向电动势和工频感应电压、电流，均是在下层极导线靠近交流线路侧的极上感应的工频分量最大，而不同直流极导线布置方案间的差别不大。

(2) 不同直流运行方式下，在 HVDC1 极 2 大地回线运行而 HVDC2 停运情况下，极 2 整流站直流阀侧产生的工频感应电流最大。

(3) 换流变能够承受的最大直流偏磁电流是制约交/直流线路平行架设长度和接近距离的主要因素。

(4) 交/直流线路耦合段内交流线路均匀换位，或换流站中性母线加装并联工频阻波器是减小换流变阀侧直流偏磁电流的有效措施。

参考文献

[1] 李新年. 交流线路对平行架设±500 kV 同塔双回直流的影响及措施研究[R]. 北京：中国电力科学研究院，2008.
LI Xin-nian. Influence of AC transmission lines on parallelly erected ±500 kV HVDC double circuit transmission lines and suppression measures[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute，2008.

[2] 李新年，蒋卫平，李涛，等. 交流线路对平行架设特高压直流线路的影响及措施研究[J]. 电网技术，2008，32（11）：1-6.
LI Xin-nian，JIANG Wei-ping，LI Tao，et al. Influence of AC transmission lines on parallelly erected UHVDC transmission lines and suppression measures[J]. Power System Technology，2008，32（11）：1-6.

[3] LI Xin-nian，JIANG Wei-ping，et al. Study on the influence of Zhebei - Shanghai 1000 kV AC lines on the parallel UHVDC transmission lines and its mitigation[C]. //2007 HVDC User Conference.Yichang(China): 2007.

[4] LI Xin-nian，JIANG Wei-ping，et al. Study on the influence of 1000 kV AC lines on the parallel UHVDC transmission lines and its mitigation[C]. //Powercon2008 &2008 IEEE Power India Conference. October 12-15. New Delhi(India): 2008.

[5] Moreau G，Ye Ming. Fundamental frequency coupling HVAC and HVDC lines in the quebec-new England multi-terminal system comparison between field measurements and EMTDC simulation[C]. //Proceedings of Power System Technology. 1998.

[6] Larsen E V. Parallel AC/DC transmission lines steady-state induction issues[D]. IEEE Trans on Power Systems，1989，4（1）：667-674.

[7] 周沛洪，修木洪，聂定珍. 同廊道架设交直流线路的相互影响[J]. 高电压技术，2003，29（9）：5-9.
ZHOU Pei-hong，XIU Mu-hong，NIE Ding-zhen. The influence between AC and DC transmission line built in same corridor[J]. High Voltage Engineering，2003，29（9）：5-9.

[8] Flisberg G. AC/DC touching line study[S]. Sweden：ABB Power System，2000.

[9] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算[J]. 高电压技术，2004，30（11）：48-49.
MA Wei-min. DC biasing current in converter transformer[J]. High Voltage Engineering，2004，30（11）：48-49.

[10] 王琦. 罗百交流线路对云广±800 kV 直流电磁干扰研究[J]. 南方电网技术研究，2007，3（1）：27-31.
WANG Qi. Study on electromagnetic interference of Luo-Bai AC transmission line on Yun-Guang ±800 kV DC transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2007，3（1）：27-31.

[11] 邵方殷. 交流线路对平行接近的直流线路的工频电磁感应[J]. 电网技术，1998，22（12）：59-63.
SHAO Fang-yin. Power frequency electromagnetic introduction on DC transmission line caused by a parallel proximate AC transmission line[J]. Power System Technology，1998，22（12）：59-63.

[12] Shi Yan，Shao Fang-yin. Study of AC/DC coupling for three Gorges to Changzhou HVDC system[C]. //Power System Technology，1998 Proceedings. Beijing（China）：1998：466-471.

[13] Gustavsen B，Irwin G，Mangelrod R，et al. Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines[C]. //IPST '99 Proceedings. Budapest（Hungary）: 1999.

[14] 鞠勇，等. ±500 kV 同塔双回直流线路导线布置及线路走廊宽度优化设计的研究[R]. 北京：中国电力科学研究院，2008.
JU Yong，et al. Study of ±500 kV HVDC double circuit transmission lines conductor arrangement and optimal design[R]. Beijing： China Electric Power Research Institute，2008.

[15] Verdolin R. Induced overvoltage on an AC-DC hybrid transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1995，10（3）：1514-1524.

收稿日期：2009-10-29；　修回日期：2009-12-15

作者简介：

李　涛（1977-），女，硕士，工程师，研究方向为电力系统无功补偿技术研究；

李新年（1977-），男，工程师，研究方向为高压直流输电、交/直流电力系统仿真工作；E-mail：lixn@epri.sgcc.com.cn

蒋卫平（1953-），男，教授级高级工程师，研究方向为电力系统仿真与电磁暂态分析。