

DOI: 10.7667/PSPC151510

计及直流电网线路损耗的直流潮流控制器安装位置选择

李国庆¹, 龙超¹, 陈洪涛²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 国网吉林省电力公司松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要: 多端柔性直流电网内部潮流的分布控制遵循 $N-1$ 准则, 即换流站可独立控制的支路数为换流站个数减去一。当直流电网支路数远多于 $N-1$ 时会有多条支路不可控, 而且换流站功率变化时也会影响到直流电网内部的潮流分布, 这时可通过直流潮流控制器增加潮流控制自由度与换流站协调配合, 保证支路潮流完全可控。验证了直流潮流控制器及换流站功率改变对电网内部潮流分布的影响, 并验证了潮流控制器可以扩大直流系统换流站功率运行区间的作用。最后以四端五节点的直流电网为例, 综合考虑各支路的安全裕度和直流系统的线路损耗, 对比分析得出直流潮流控制器最优安装位置。

关键词: 多端柔性直流电网; 直流潮流控制器; 线路损耗; 安装位置

Installation position selection of DC power flow controller considering the line-loss of DC grid

LI Guoqing¹, LONG Chao¹, CHEN Hongtao²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Songyuan Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: The power flow control capability in a multi-terminal HVDC system follows $N-1$ rule, it means that the number of controllable branch equals to converter number minus one. If the number of branches in the DC grid are far more than $N-1$, it is difficult to ensure all branches controllable, and the change of converter power will also affect the distribution of DC power flow. The introduction of DC power flow controller can approve the power flow control freedom, cooperate with converters and guarantee all branches to be controllable. The influence of DC power flow controller and the change of converter power on the distribution of power flow in DC grid and the function to expand the region of operation for the converters in DC grid are verified. Finally, a meshed VSC-HVDC grid with 4 terminals and 5 branches is used to analyze the optimal location of DCPFC considering the safety of branches and the line-loss of the DC grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016).

Key words: multi-terminal HVDC system; DC power flow controller (DCPFC); line loss; installation position

0 引言

近年来高压直流输电技术在大容量远距离输电和交流系统互联等方面展现出巨大优势^[1]。随着传统化石能源的日益枯竭与环境压力的不断增加, 风光储等清洁型新能源快速发展, 其输出功率具有的波动性、间歇性等特点使得传统电网结构、运行技术受到越来越多的限制与挑战, 而通过柔性高压直流输电(VSC-HVDC)技术, 新能源实现了与交流系

统的平滑接入^[2-3]。VSC 成为解决新能源大规模并网的有效技术手段之一, 这与 VSC-HVDC 技术灵活、安全的运行特点, 有功无功独立可控以及潮流反转时保持电压极性不变等特性有关^[4-6]。正是由于与传统直流输电技术相比, VSC 在潮流反转时直流电流方向反转而直流电压极性不变, 且没有换相失败等问题, 因而有利于构成多端柔性直流输电(VSC-MTDC)系统^[7-9]。

多端柔性直流电网是由多个柔性换流站端经过直流网络互联组成的电力传输系统, 具有网孔、直流端之间有多条冗余传输线路, 能够实现新能源的

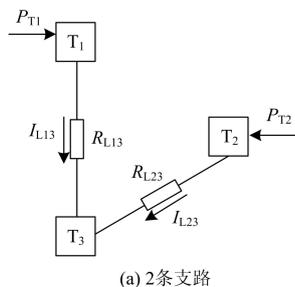
平滑接入, 具有灵活、安全的潮流控制特性, 是一种适应性更强的供电模式^[10-11]。一个合理的直流电网系统应在未对输电线路进行限制时具备足够的潮流控制自由度。但根据 $N-1$ 原理, 含有 N 个换流站的直流电网中可由换流站独立控制的支路数为 $N-1$, 超出 $N-1$ 的支路潮流不可控而可能导致线路过负荷。因此, 需要引入直流潮流控制器(DCPFC)配合换流站控制各支路潮流, 增加控制自由度^[12-14]。

近年来, 关于 DCPFC 的研究已在国内外展开。文献[15-16]提出了可变串联电阻器、DC/DC 变换器和辅助电压源等潮流控制设备的拓扑结构并对不同类型的 DCPFC 控制范围、控制效果、响应速度和运行损耗等进行了对比分析, 最终得出辅助电压源在控制范围及控制效果等方面表现最佳的结论。文献[17]提出基于晶闸管的 DCPFC, 分析其工作原理并给出其控制流程, 验证了控制效果。文献[18]提出一种模块化多电平 DCPFC 并与晶闸管型 DCPFC 对比, 验证了其由于晶闸管型 DCPFC 的过电压穿越性能。文献[7]分析了 DCPFC 对直流电网内部潮流分布的影响并在以保证所有支路运行于载流限值内为目标时提出了基于电流灵敏度的 DCPFC 安装位置确定方法。

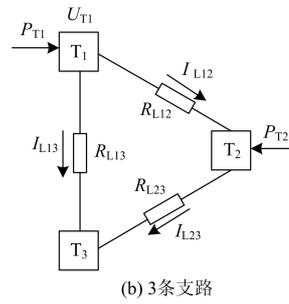
本文以附加电压源型 DCPFC 为例, 通过研究换流站节点运行功率改变对支路电流分布的影响及支路电流过载可能引发的严重后果, 说明了多端直流电网加装 DCPFC 的必要性; 对比加装 DCPFC 前后直流系统换流站节点合理运行区间的大小展示了 DCPFC 控制支路潮流之外的附加效果; 最后以各支路不过载和最小线路损耗为目标选择 DCPFC 安装位置。

1 直流电网

在图 1(a)所示三端直流输电系统中, 换流站 T_1 和 T_2 为定有功功率运行模式, 换流站 T_3 运行于定直流电压模式。在换流站 T_1 和 T_2 之间增加一条输电线路 L12, 构成图 1(b)所示的三端直流电网。这样使得 T_1 的功率增加了由 L12-L23 输送至 T_3 的途径。各支路参数见表 1。



(a) 2条支路



(b) 3条支路

图 1 三端直流输电系统

Fig. 1 3-terminal MTDC

表 1 三端系统参数

Table 1 Parameters of 3-terminal system

节点	模式	P_{ref}/MW	支路	长度/ km	R/Ω	限值/kA
1	P	200	L12	330	4	0.4
2	P	100	L13	413	5	0.87
3	V	—	L23	248	3	0.44

换流站 T_3 的直流电压设定为 250 kV, 换流站 T_1 和 T_2 注入直流电网的有功功率分别为 200 MW 和 100 MW。两条线路和三条支路的直流输电系统的潮流分布见表 2。可见在增加支路 L12 后分担了一部分支路 L13 的功率, 从节点 T_1 经由支路 L12、L23 输送至节点 T_3 。

表 2 潮流计算结果

Table 2 Power flow results

	U_{T1}/kV	U_{T2}/kV	I_{L12}/kA	I_{L23}/kA	I_{L13}/kA
2条支路	253.9	251.2	—	0.398	0.788
3条支路	252.8	251.9	0.230	0.627	0.561

在直流系统中, 仅由节点电压和支路电阻便可求解各支路的电流。各支路电流的等式为

$$\begin{cases} I_{L13} = \frac{U_{T1} - U_{T3}}{R_{L13}} \\ I_{L23} = \frac{U_{T2} - U_{T3}}{R_{L23}} \\ I_{L12} = \frac{U_{T1} - U_{T2}}{R_{L12}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{T1} 、 U_{T2} 、 U_{T3} 分别为各换流站节点的电压; I_{L13} 、 I_{L23} 、 I_{L12} 分别为各支路的电流; R_{L13} 、 R_{L23} 、 R_{L12} 分别为各支路的电阻值。根据上式可以获得交流系统经由换流站 T_1 和 T_2 注入直流系统的有功功率 P_{T1} 、 P_{T2} 。

$$\begin{cases} P_{T1} = U_{T1}^2 \left[\frac{1}{R_{L13}} + \frac{1}{R_{L12}} \right] - U_{T1} \left[\frac{U_{T2}}{R_{L12}} + \frac{U_{T3}}{R_{L13}} \right] \\ P_{T2} = U_{T2}^2 \left[\frac{1}{R_{L23}} + \frac{1}{R_{L12}} \right] - U_{T2} \left[\frac{U_{T1}}{R_{L12}} + \frac{U_{T3}}{R_{L23}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

根据表 1 中系统的参数可以得到图 2 所示的定功率运行的换流站功率运行区间图, 表示其合理运行区间的大小。

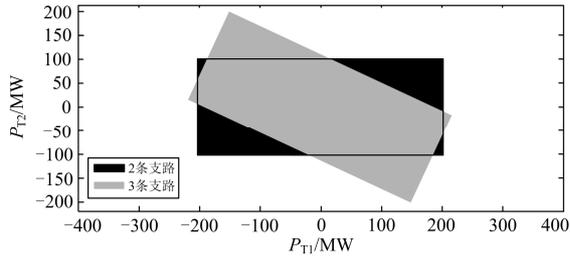


图 2 三端直流系统功率运行区间

Fig. 2 Region of operation for 3-terminal MTDC

形成直流电网后, 各换流站相互配合维持系统的稳定运行, 但换流站仅能控制交流侧与直流系统交换的功率, 而无法控制直流系统内部潮流在各支路的分配。

随着新能源的不断发展, 势必会造成多点供电、多点受电的直流网架结构, 在电力系统规划过程或者实际运行中换流站功率的调整, 都会对系统内部潮流在各线路间的分布产生影响。以图 1(b)所示系统为例, 研究换流站功率改变对直流电网内部各支路电流分布的影响情况, 换流站 T_2 的功率由 -250 MW 变化至 250 MW 时系统内部各支路电流的变化趋势见图 3。

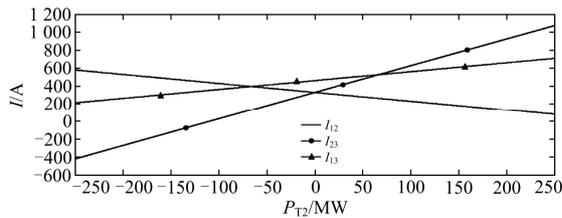


图 3 三端直流系统功率运行区间

Fig. 3 Region of operation for 3-terminal HVDC

可见, 当换流站运行功率改变, 直流电网内部各支路的电流也会发生变化。随着直流电网换流站端点的增多, 换流站运行功率的变化会对各支路电流带来更复杂的影响。而可由换流站独立控制的支路数仅为换流站个数减去一, 为防止直流电网中某条支路因过载而切除运行, 致使相邻支路相继切除甚至导致换流站的切除而威胁到电力系统的安全运

行, 引入 DCPFC 增加直流电网潮流的控制自由度, 实现直流电网内部潮流分布的完全可控^[13]。在直流电网规划阶段、运行阶段以及新的换流站端接入阶段都可以通过潮流计算分析功率在直流电网内部各支路的分布情况, 并且根据实际运行控制需要选择安装和调节 DCPFC。

2 潮流控制器

2.1 辅助电压源型 DCPFC

本文基于辅助电压源型 DCPFC 展开研究。辅助电压源型 DCPFC 即为一个输出电压幅值和方向可根据控制需求决定的电压源, 其原理图可用图 4 表示, 其中 U_C 为附加电压源的输出电压值。

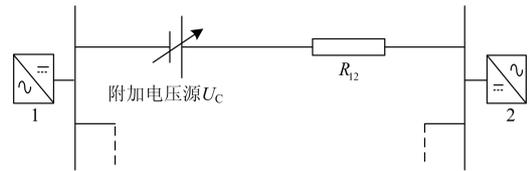


图 4 附加电压源

Fig. 4 Topology of series voltage source

附加电压源可通过图 5 所示的晶闸管整流器得以实现, 由交流侧获取能量经整流后输出直流电压调节潮流分布。此类型附加电压源原理与直流电网主换流站相同, 所以其中的晶闸管也可用 IGBT 替换, 即用一个单端 VSC 换流站代替^[15-17]。由于直流电网中工作电压为数百千伏而支路电阻仅为几欧姆, 线路压降的些许改变就会引起支路电流的大幅变化, 所以附加电压源的容量相对于换流站来说是很小的, 通常附加电压源的电压输出值取额定电压的 $\pm 2.5\%$ 已足够满足控制需求^[15]。

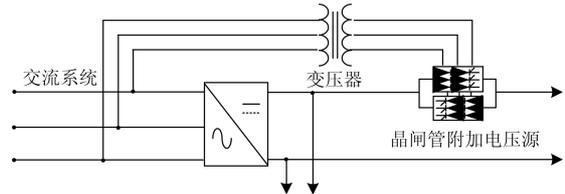


图 5 晶闸管附加电压源

Fig. 5 Thyristor type of DCPFC

2.2 控制作用等效

在研究附加电压源产生的控制效果时也可以将其外特性用图 6 所示的理想变压器模型代替。图中 M 是一次侧与二次侧电压的比值, 即变压器变比。通过调整控制信号, 改变变比 M 的值, 从而改变线路压降, 最终使电流、功率在各支路之间重新分配。

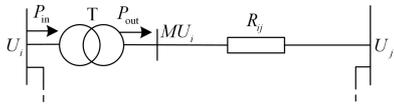


图 6 理想直流变压器模型

Fig. 6 Ideal DC transformer

这里理想变压器等效变比 M 的公式见式(3), 其中 U_i 是换流站电压, U_C 是附加电压源的输出电压值。

$$M = \frac{U_i + U_C}{U_i} \quad (3)$$

当在图 1(b)系统的支路 L12 上安装 DCPFC 后各支路电流公式为

$$\begin{cases} I'_{L13} = \frac{U_{T1} - U_{T3}}{R_{L13}} \\ I'_{L23} = \frac{U_{T2} - U_{T3}}{R_{L23}} \\ I'_{L12} = \frac{MU_{T1} - U_{T2}}{R_{L12}} \end{cases} \quad (4)$$

对于定有功功率控制运行的换流站 T_1 、 T_2 , 加装 DCPFC 后注入有功功率为^[7]

$$\begin{cases} P'_{T1} = U_{T1}^2 \left[\frac{1}{R_{L13}} + \frac{M^2}{R_{L12}} \right] - U_{T1} \left[\frac{MU_{T2}}{R_{L12}} + \frac{U_{T3}}{R_{L13}} \right] \\ P'_{T2} = U_{T2}^2 \left[\frac{1}{R_{L23}} + \frac{1}{R_{L12}} \right] - U_{T2} \left[\frac{MU_{T1}}{R_{L12}} + \frac{U_{T3}}{R_{L23}} \right] \end{cases} \quad (5)$$

同样, 可以得到加装 DCPFC 之后换流站的合理运行区间如图 7。加装 DCPFC 后换流站的合理运行区间比两条支路及 3 条支路明显增大。

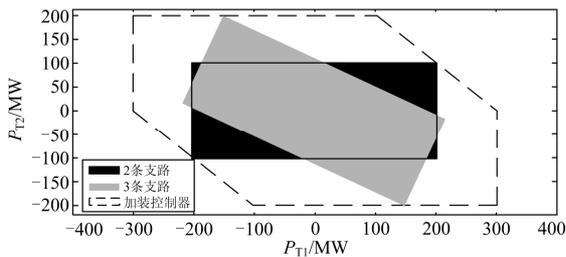


图 7 三端直流系统功率运行区间

Fig. 7 Region of operation for 3-terminal MTDC

3 计及线路损耗的 DCPFC 安装位置选择

以图 8 所示四端、五支路的直流电网为例, 直流系统中通常由一个或几个换流站控制直流电压, 维持直流系统电压为 230 kV; 其余换流站控制有功功率, 运行在定有功功率控制模式。该算例系统中, 换流站 4 运行于定直流电压控制模式, 换流站 1、2、

3 运行于定有功功率模式, 系统各节点、各支路的运行参数见表 3。

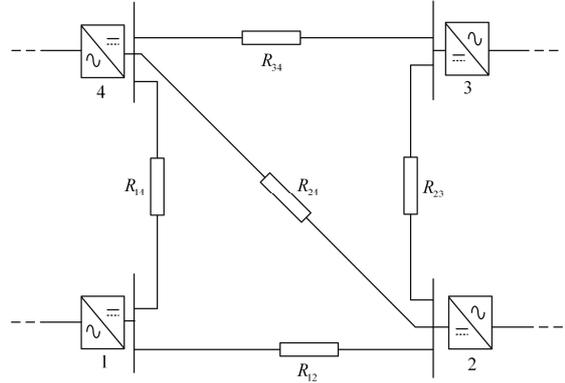


图 8 算例系统

Fig. 8 Case study system

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

节点	模式	P_{ref}/MW	支路	长度/ km	R/Ω	限值/ A
1	P	100	L12	75	1.051 8	500
2	P	100	L14	45	2.313 9	500
3	P	-160	L23	60	0.510 9	500
4	V	—	L24	75	0.601	500
			L34	45	1.202	500

系统正常运行时各换流站节点电压、支路电流(首端指向末端)、各支路载流利用率及安全裕度见表 4。其中支路 L23 的载流利用率最高为 90.9%, 安全裕度仅为 9.1%, 很有可能出现过载被切除运行而危及直流系统乃至交流系统的安全运行。为此, 通过安装 DCPFC 配合换流站的控制, 避免上述情况发生。

表 4 系统正常运行潮流分布

Table 4 PF results in normal condition

节点	电压/kV	支路	电流/A	利用率/ %	裕度/ %
1	230.37	L12	272.8	54.6	45.4
2	230.09	L14	161.6	32.3	67.7
3	229.85	L23	454.3	90.9	9.1
4	230.00	L24	253.4	50.7	49.3
		L34	-241.5	48.3	51.7

求解 DCPFC 处于不同安装位置时各支路电流关于控制参数 M 的灵敏度, 见表 5。灵敏度数值的大小代表控制参数 M 增大“1”时支路电流的改变量(单位为 kA); 灵敏度的符号代表支路电流随控制

参数 M 的变化趋势。由于正常工作时各支路的电流限制在 $-500 \sim 500$ A, 结合表 5 中电流灵敏度的数值大小可知, 参数 M 进行 $0.001 \sim 0.01$ 的调整, 即 DCPFC 输出几百伏特或上千伏特的辅助电压值, 就能够满足控制需求。

表 5 正常运行时 DCPFC 不同配置位置电流灵敏度

Table 5 Current sensitivity in normal operation with different location of DCPFC

支路	DCPFC 安装支路				
	L12	L14	L23	L24	L34
L12	63.4	63.4	-14.9	-48.4	14.9
L14	-63.4	63.4	14.9	48.4	-14.9
L23	14.9	14.9	161.6	146.6	161.6
L24	48.4	48.4	146.6	195.1	-146.6
L34	14.9	14.9	-161.6	146.6	161.6

在保证直流系统中各支路运行在载流限值以内的前提下对参数 M 进行调整, 选择 M 调整最小的支路作为 DCPFC 安装支路时安装支路选择为支路 L23 或 L34。

如图 9, 以安装在支路 L23 为例, 各支路电流随着 M 连续变化的趋势见图 10。可见调整电压型 DCPFC 的理想变比 M , 直流系统内部的潮流在各支路之间的分布情况得到了调整。同时也可以看出, 参数 M 仅由 0.99 变化至 1.01, 支路电流的变化达到数千安培, 即 DCPFC 输出很小的辅助电压就能够引起支路电流的剧烈变化。

当考虑直流系统的线路损耗时, DCPFC 安装于不同支路直流系统线损随着参数 M 的变化趋势图见图 11。当 DCPFC 分别安装于不同支路时, 由直流系统的线路损耗随参数 M 的变化曲线可见, 当 DCPFC 未参与调节($M=1$)时直流系统的线路损耗最小, 无论参数 M 增大或减小都会导致系统线损增大。

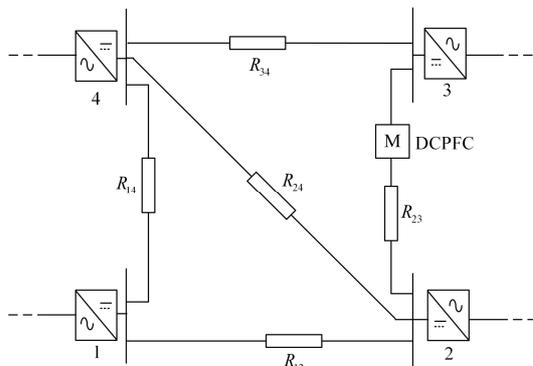


图 9 安装 DCPFC 后的算例系统

Fig. 9 Case study system after installing DCPFC

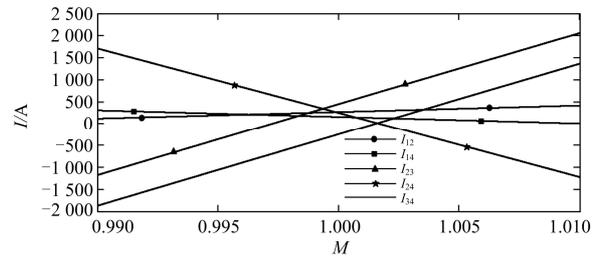


图 10 各支路电流随理想变比 M 的变化趋势图

Fig. 10 Diagram of branch current trend along with M

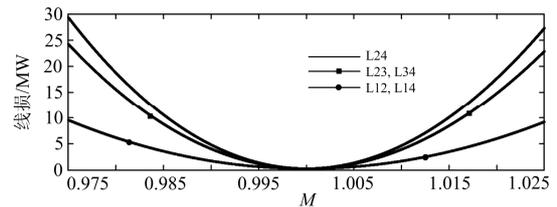


图 11 线损随 M 变化

Fig. 11 Line-loss trend with M when DCPFC in difference lines

由于支路 L12 和 L14、支路 L23 和 L34 的电流灵敏度及线路损耗曲线相同, 所以仅选择支路 L12、L34 及 L24 三条支路进行对比。以将支路 L23 的载流利用率降为 80% 为例, 分别讨论 DCPFC 安装在支路 L12、L34 及 L24 三条支路时的参数 M 调整情况和线路损耗。调整前后支路潮流分布情况分别见表 6、表 7 和表 8。

表 6 DCPFC 安装于 L12 时调整 L23 利用率为 80%

Table 6 Adjust utilization rate of L23 to 80% when DCPFC in L12

支路	调整前		调整后	
	电流/A	利用率/%	电流/A	利用率/%
L12	272.8	54.6	36.8	7.36
L14	161.6	32.3	391.7	78.3
L23	454.3	90.9	399.6	79.9
L24	253.4	50.7	76.3	15.3
L34	-241.5	48.3	-296.2	59.2

表 7 DCPFC 安装于 L34 时调整 L23 利用率为 80%

Table 7 Adjust utilization rate of L23 to 80% when DCPFC in L34

支路	调整前		调整后	
	电流/A	利用率/%	电流/A	利用率/%
L12	272.8	54.6	267.8	53.6
L14	161.6	32.3	166.6	33.3
L23	454.3	90.9	400.0	80
L24	253.4	50.7	302.7	60.5
L34	-241.5	48.3	-295.7	59.1

表 8 DCPFC 安装于 L24 时调整 L23 利用率为 80%

Table 8 Adjust utilization rate of L23 to 80% when

DCPFC in L24

支路	调整前		调整后	
	电流/A	利用率/%	电流/A	利用率/%
L12	272.8	54.6	290.8	58.2
L14	161.6	32.3	143.7	28.7
L23	454.3	90.9	400.1	80
L24	253.4	50.7	325.7	65.1
L34	-241.5	48.3	-295.8	59.2

可见 DCPFC 安装于支路 L12、L34 或 L24 都可以通过参数调整,按需求输出辅助电压,从而达到调整支路电流的目的。安装于支路 L12 时,参数 M 的调整量为 $-0.003\ 64$,辅助电压为 $837.2\ \text{V}$,调整后直流系统的线路损耗为 $0.492\ 8\ \text{MW}$;安装于支路 L34 时,参数 M 的调整量为 $-0.000\ 336$,辅助电压为 $77.3\ \text{V}$,调整后直流系统的线路损耗为 $0.305\ 4\ \text{MW}$;安装于支路 L24 时,参数 M 的调整量为 $0.000\ 37$,辅助电压为 $85.1\ \text{V}$,调整后直流系统的线路损耗为 $0.307\ 5\ \text{MW}$ 。结合表 5,DCPFC 安装于支路 L23(L34)时的电流灵敏度数值大小为安装于支路 L12(L14)时的 10.85 倍,DCPFC 输出辅助电压值相差十多倍。对比表 6 和表 7,较之安装于支路 L12,安装于支路 L34 时 DCPFC 以更小的输出电压获得了更好的调节效果,并且在调节之后的线路损耗更小,可知支路 L23(L34)更适合选作 DCPFC 的安装支路。同样,经过对比可知支路 L24 比支路 L12(L14)更适合安装 DCPFC。

对比 DCPFC 安装于支路 L23 和 L24 时的情形,调整支路 L23 载流利用率为 80%,DCPFC 的调整量为 $-0.000\ 336$ 、 $0.000\ 37$;输出电压值为 $77.3\ \text{V}$ 、 $85.1\ \text{V}$;调整后直流系统的线路损耗为 $0.305\ 4\ \text{MW}$ 、 $0.307\ 5\ \text{MW}$,可见二者调整特性极为接近。要在支路 L23 和 L24 之间选择更为合适的 DCPFC 安装位置,可以通过对不同特性参数加权优化,确定 DCPFC 的安装位置。由于系统 4 个换流站可独立控制支路数为 3,要满足所有支路潮流可控时需要安装的 DCPFC 个数为 1~2 个。可以按照以上步骤进行第二个 DCPFC 安装位置的选取。

4 结论

本文首先验证了换流站功率的改变对直流电网内部潮流分布的影响,进一步印证了引入直流潮流控制器增加直流电网潮流控制自由度的必要性。其中换流站功率与支路电流的变化趋势图可以为直流

电网规划、运行以及新能源发电厂的扩建提供依据。其次,验证了直流潮流控制器扩大换流站功率运行区间的作用。最后以四端五支路的直流电网为例,以各支路不过载和直流系统最小线路损耗为目标确定了直流潮流控制器的最优安装位置。

参考文献

- [1] 任敬国,李可军,刘合金,等.基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J].电力系统自动化,2013,37(15):133-139.
REN Jingguo, LI Kejun, LIU Hejin, et al. Simulation on improved active power control features VSC-MTDC based systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 133-139.
- [2] DESPOUYS O. Offshore DC grids: impact of topology on power flow control[C] // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham: IET, 2012: 1-6.
- [3] 谭涛亮,张尧.计及直流控制方式转换和换流变变比调整的交直流潮流算法研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):40-45.
TAN Taoliang, ZHANG Yao. Study on AC/DC power flow algorithm considering the switching of DC control mode and converter transformer ratio[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 40-45.
- [4] 赵静,赵成勇,孙一莹,等.模块化多电平直流输电联网风电厂时的低电压穿越技术[J].电网技术,2013,37(3):726-733.
ZHAO Jing, ZHAO Chengyong, SUN Yiyang, et al. Low voltage ride-through technology for wind farms connected to power grid via MMC-based HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 726-733.
- [5] 任敬国,李可军,赵建国,等.基于 $N-1$ 准则 VSC-MTDC 输电系统稳态调控方案[J].电力自动化设备,2013,33(2):74-80.
REN Jingguo, LI Kejun, ZHAO Jianguo, et al. Steady-state regulation scheme of VSC-HVDC transmission system based on $N-1$ criterion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 74-80.
- [6] 王磊,李兴源,李宽,等.伪双极 LCC-VSC 型混合高压直流输电系统向无源网络供电的研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(21):27-33.
WANG Lei, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Research of pseudo bipolar LCC-VSC hybrid HVDC system supplying passive network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 27-33.
- [7] 李国庆,龙超,孙银锋,等.直流潮流控制器对直流电网的影响及其选址[J].电网技术,2015,39(7):1786-1792.

- LI Guoqing, LONG Chao, SUN Yinfeng, et al. Impact and location analysis of DC power flow controller on DC grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1786-1792.
- [8] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [9] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC grid technology and DC grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [10] 王义军, 张玉, 张作霖. 典型±660 kV HVDC 系统建模与运行仿真研究[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(1/2): 80-83.
- WANG Yijun, ZHANG Yu, ZHANG Zuolin. Typical ±660 kV HVDC system modeling and operation simulation research[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2013, 33((1/2): 80-83.
- [11] 吴彦维, 李晔, 陈大鹏, 等. 10 000 MW 特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 108-113.
- WU Yanwei, LI Ye, CHEN Dapeng, et al. Research on control system for 10 000 MW UHVDC station B hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 108-113.
- [12] 许烽, 徐政, 刘高任. 新型直流潮流控制器及其在环网式直流电网中的应用[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2644-2650.
- XU Feng, XU Zheng, LIU Gaoren. A new type of DC power flow controller and its applications in meshed DC grids[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2644-2650.
- [13] 龙超, 李国庆, 孙银锋, 等. 基于等效注入功率法的含直流潮流控制器的直流电网潮流计算方法研究[J]. 智能电网, 2015, 3(3): 208-213.
- LONG Chao, LI Guoqing, SUN Yinfeng, et al. Power flow calculation of DC grid with DC power flow controller based on equivalent power injection method[J]. Smart Grid, 2015, 3(3): 208-213.
- [14] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风电并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
- WEN Jinyu, CHEN Xia, YAO Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61.
- [15] VEILLEUX E, OOI B T. Power flow analysis in multi-terminal HVDC grid[C] // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE). Phoenix, AZ: IEEE, 2011: 1-7.
- [16] VAN HERTEM D, VERBOOMEN J, PURCHALA K, et al. Usefulness of DC power flow for active power flow analysis with flow controlling devices[C] // The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. IET, 2006: 58-62.
- [17] VEILLEUX E, OOI B T. Multiterminal HVDC with thyristor power-flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1205-1212.
- [18] 许烽, 徐政. 一种适用于多端直流系统的模块化多电平潮流控制器[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 95-102.
- XU Feng, XU Zheng. A modular multilevel power flow controller for multi-terminal HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 95-102.

收稿日期: 2015-08-25; 修回日期: 2015-10-08

作者简介:

李国庆(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化; E-mail: LGQ@mail.nedu.edu.cn

龙超(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统建模与仿真分析; E-mail: longzoudaokou@126.com

陈洪涛(1972-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制。

(编辑 魏小丽)