

MMC直流配电网的最优潮流控制策略

针对MMC柔性直流配电系统（MMC Based DC Distribution System, MMC-DCDS），从运行经济性和电压稳定性方面入手，提出了适用于MMC-DCDS的最优潮流控制策略。首先针对研究MMC-DCDS系统的拓扑结构，明确了其可实现的运行方式和对应潮流分布特点；然后结合该系统的损耗特点建立了最小网损控制策略的数学模型，并通过包含精英策略的遗传算法对该数学模型进行求解；最后结合系统各种运行方式的特性研究分析了对应的控制策略。在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建模型并进行时域仿真，结果表明：所提出的最优潮流控制策略可以在维持交流电压稳定的情况下，有效减小MMC-DCDS的输配电损耗。

李树鹏^{1,2} 徐振宇² 孙刚³ / 1. 国网天津市电力公司电力科学研究院
2. 华北电力大学电气与电子工程学院 3. 北京四方继保自动化股份有限公司

0 引言

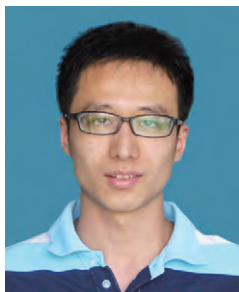
模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）是由德国学者R. Marquardt提出的电压源型换流器（Voltage Source Converter, VSC）的一种新拓扑结构^[1-2]。基于MMC换流器的直流输电系统对电力电子器件的要求较低，具有良好的可扩展性，谐波畸变率小，开关损耗低，在分布式发电并网、孤岛及城市电网供电以及异步交流电网互联等领域具有广阔的应用前景^[3-4]。

随着城市负荷的复杂化和分布式电源接入率的快速增加，传统交流配电网在满足供电可靠性、电能质量以及输送容量上面临越来越大的困难。在用电密集的城市电网中采用MMC技术，可利用其快速可控性解决城市供电中存在的供电困难、运行成本高以及潮流难以控制的问题，维持城市电网的安全、可靠和

经济运行^[5]。发展直流配电系统还可以利用其良好的兼容性将分布式新能源与储能设备接入，减少迅速发展的新能源发电设备、储能设备、电动汽车充电站和大量直流负荷接入电网的中间环节。这种方式可以降低上述设备和负荷的接入成本，提高功率转换效率和电能质量，促进能源的合理有效经济利用，充分发挥分布式能源的价值和效益。随着新能源发电渗透率的日渐提升，直流配电在未来电网中将发挥越来越重要的作用^[6]。

面对日益增长的高密度负荷，城市地区交流配电网运行中遇到了诸多问题。将直流配电技术应用于城市电网建设，是解决该问题比较有前景的方案。

针对MMC直流输电的优化控制技术，国内外学者作了大量研究，并取得了一系列成果。文献[7]研究了含柔性直流输电系统的潮流计算方法；文献[8-9]对含柔性直流输电的交直流系统无功电压和有功潮流的优化控制方法进行了研究；文献[10]研究分析了多端柔性直流输电的经济性问题；文献[11-13]针对实际的工程应用，对MMC直流输电的控制方式和运行性能进行了分析研究。上述研究针对的都是直流输电系统，在包含分布式电源及储能设备的直流配电网中，其功率损耗特点和控制策略又表现出一些新的特征。本文针对MMC柔性直流配电系统（MMC Based DC Distribution System, MMC-DCDS），根据系统运行特性提出了最优潮流控制策略。



李树鹏/硕士研究生

关键词/Keywords

柔性直流配电网 ·
最小网损 ·
包含精英策略 ·
多运行方式 ·
PSCAD/EMTDC ·

1 待研究系统模型

本文研究的柔性直流智能配电系统采用手拉手的拓扑结构，通过两个MMC换流站与交流主网交换能量；交流负荷、直流负荷、光伏发电、储能装置及电动汽车充电桩采用“T”形连接的方式，通过VSC换流器或DC/DC变压器接到直流线路上。MMC直流配电系统主接线拓扑如图1所示。

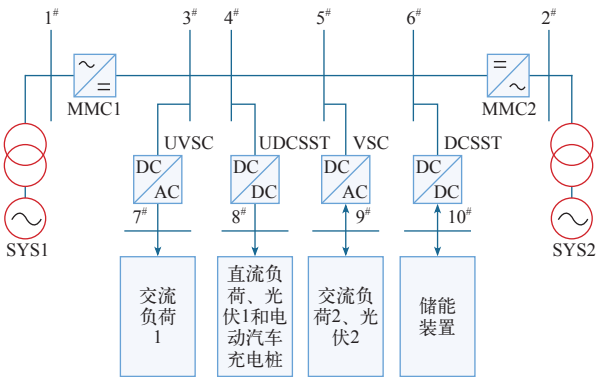


图1 MMC直流配电系统主接线拓扑

在MMC直流配电网中，包含多种类型的负荷、分布式电源及储能设备，它们通过换流器或DC/DC直流变压器接到直流线路上，故整个配电系统是典型的多端系统。在不同的情况下，为保证系统持续供电，即使故障或不正常运行状况下系统也不会停运，则该系统需具有多种运行方式。MMC直流输电系统可实现的运行方式及有功功率、无功功率流向如表1所示。

表1 系统运行方式及运行情况

运行方式	MMC1	MMC2	UVSC	UDCSST	VSC	DCSST
正常运行	$P+/-Q$	$P+/-Q$	$P-$	$P-$	$P+/-$	$P+/-$
单换流站运行	$P+/-Q$	$\times$	$P-$	$P-$	$P+/-$	$P+/-$
隔离运行	$P+/-Q$	$P+/-Q$	$P-$	$P-$	$P+/-$	$P+/-$
功率支援运行	$P+/-Q$	$P+/-Q$	$P-$	$P-$	$P+/-$	$P+/-$
STATCOM运行	Q	Q	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$

注：1. $P+$ 表示有功功率流入直流网络。
2. $P-$ 表示有功功率流出直流网络。
3. Q 表示交换无功功率。

2 最小网损控制策略

与MMC直流输电系统相比，MMC直流配电系统包含更多类型的电源和负荷，因此其控制策略更加复杂。该系统中，电源主要包含两侧的等效交流电源以及太阳能、风电等多种分布式电源；负荷主要包含储能设备、电动汽车充电站等可控负荷以及常规交直流负荷。MMC直流配电网的控制目标可归纳为以下几点：

- 1) 保证MMC直流配电系统中负荷的供电可靠性和电能质量。
- 2) 实现分布式电源的充分利用。
- 3) 合理分配功率，尽量减小网损，保证配电网正常运行时的经济性。

在MMC直流配电网中，两端的交流系统都可以为配电网供电。由于包含多种负荷、分布式电源及储能设备，配电网的负荷需求容易发生改变，此时系统的损耗特性也将随之发生变化。同时，配电系统中包含储能装置，其充放电策略会对系统损耗产生较大影响。传统的控制策略一般采用定功率控制，而未考虑到上述的损耗变化情况。本文采用最小网损控制策略来动态地改变功率参考值，从而实现降低输电损耗、提高电网运行经济性的目的。

2.1 优化数学模型的建立

以输电网传输网损最小为优化目标，并考虑交流系统电压的稳定和储能设备的合理调配。系统阻抗如图2所示，MMC直流配电网潮流优化问题的目标函数可表示为

$$\min : W_{\text{loss}} = \sum_{i=0}^T \sum_{i=1}^7 I_{i,t}^2 R_i \Delta t \tag{1}$$

式中， $I_{i,t}$ 为*t*时刻的电流； R_i 为线路*i*的等效电阻。

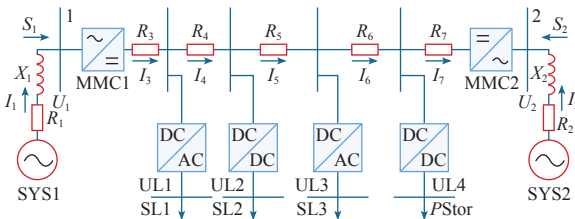


图2 系统阻抗

图2所示系统的功率平衡关系可表示为

$$\begin{aligned}
 I_{1,t} &= (\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}) / U_1 \\
 I_{2,t} &= (\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}) / U_2 \\
 I_{3,t} &= (P_1 - P_{MMC1}) / U_{DC} \\
 I_{3,t} &= I_{4,t} + (PL1_t + P_{UVSC}) / U_{DC} \\
 I_{4,t} &= I_{5,t} + (PL2_t + P_{UDCSST}) / U_{DC} \\
 I_{5,t} &= I_{6,t} + (PL3_t + P_{VSC}) / U_{DC} \\
 I_{6,t} &= I_{7,t} + (P_{Stor} + P_{DCSST}) / U_{DC} \\
 I_{7,t} &= -(P_2 - P_{MMC2}) / U_{DC}
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $PL1_t$ 、 $PL2_t$ 和 $PL3_t$ 分别为微电网或负荷与配电网交换的功率; P_{MMC1} 、 P_{MMC2} 、 P_{UVSC} 、 P_{UDCSST} 、 P_{VSC} 和 P_{DCSST} 分别为变流器的损耗, 这里假设其损耗随负荷变化不大; U_1 、 U_2 和 U_{DC} 分别为两侧交流大系统和直流线路的电压; P_1 、 Q_1 和 P_2 、 Q_2 分别为交流大系统与直流配电网交换的有功和无功功率; P_{Stor} 为储能设备的充放电功率。电流 I 和功率 $\tilde{S}$ 的正方向如图2的箭头所示。

系统中储能装置的最大充放电功率和容量是有限制的, 由式(3)来约束, 即

$$\begin{aligned}
 P_{\min} &\leq P_{Stor} \leq P_{\max} \\
 0 &\leq \sum_{t=0}^n P_{Stor,t} \Delta t \leq W_{\max} \quad (n=1, 2, \dots, T)
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为充放电功率的上下限; $W_{\max}$ 为储能设备的最大容量。

MMC1和MMC2最大负荷容量用式(4)来进行约束, 即

$$\begin{aligned}
 S_{1,\min} &\leq S_{1,t} \leq S_{1,\max} \\
 S_{2,\min} &\leq S_{2,t} \leq S_{2,\max}
 \end{aligned} \quad (4)$$

两侧的交流母线电压用式(5)约束, 即

$$\begin{aligned}
 \Delta U_{1\min} &\leq \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_1} \leq \Delta U_{1\max} \\
 \Delta U_{2\min} &\leq \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_2} \leq \Delta U_{2\max}
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $R + jX$ 为线路阻抗; $\Delta U_{\max}$ 和 $\Delta U_{\min}$ 分别为线路压降的上下限。

在该模型中, 根据功率平衡关系, 待优化量有两个, 即SYS1的有功功率 P_1 和储能装置的功率 P_{Stor} 。

2.2 模型的求解

优化是一个与时间相关的复杂的二次优化。问题的约束中包含变量对时间的叠加效应以及在任意时刻储能设备自身的容量限制, 利用传统二次优化算法难以求解。因此本文采用包含精英策略的遗传算法进行求解, 算法流程如图3所示。

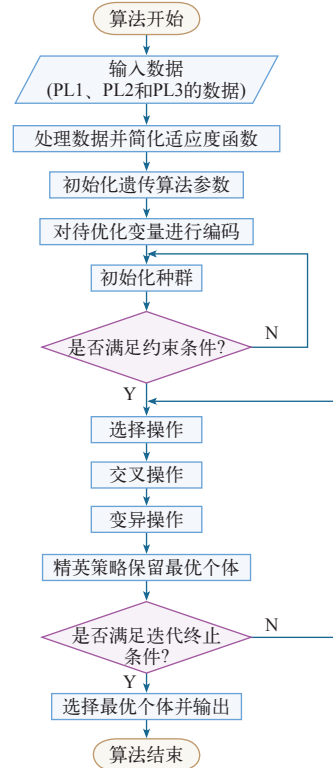


图3 含精英策略遗传算法的流程

具体的实现方法可分为如下七步:

- 1) 输入配电网各“T”接部分的功率数据。
- 2) 化简并推导出适应度函数 $f(P_1, P_{Stor})$ 的表达式。
- 3) 初始化算法的参数。循环次数 $N=20$, 循环终止条件 $\varepsilon=0.01$, GA算法的其他初始化参数如表2所示。
- 4) 初始化种群。在参数范围内随机产生数目为 n 的个体组成初始种群。
- 5) 执行遗传算法。选择操作: 在当前种群中, 采用轮盘赌策略选择基因优良的个体作为父代; 交叉操作: 将父代与种群最优个体交叉后产生的新个体与原种群合并, 选择 n 个适应度函数值

高的个体构成新种群；变异操作：使种群中的个体以一定的概率发生变异。

6) 用精英策略保留上一代的最优个体，并替换当代中的最差个体，形成新的种群。

7) 当相邻代种群最优个体的适应度函数值满足 $|f_{i+1} - f_i| \leq \varepsilon$ ，或循环次数达到 N 时，选择当前种群的最优个体并输出；否则，转步骤5)。

表2 遗传算法的初始化参数

种群规模	优选数目	交叉概率	变异概率	变异扰动幅度
30	15	0.85	0.65	0.1

3 各种运行方式下的控制策略

上述优化问题是在系统正常运行情况下（系统处于双端供电）提出的。当系统处于不同的运行方式时，约束方程会发生改变，此时应切换系统的控制策略来实现配电网的协调运行。不同运行方式下控制模式的切换属于换流站级控制，采用主从控制策略。下面分别就系统处于单换流站运行、隔离运行、功率支援运行和STATCOM运行时的具体控制策略进行分析。

3.1 单换流站运行

当系统处于单换流站运行方式时，只有SYS1或SYS2与配电网交换功率，反映在约束方程中可令 $S_1 = 0$ （或 $S_2 = 0$ ），其他约束条件不变。在该运行方式下，MMC1或MMC2的有功类控制为定直流电压控制模式，求解出的指令值只用于控制储能装置。

3.2 隔离运行

当系统处于双端隔离运行方式时，SYS1侧和SYS2侧系统的功率无法交换，需要分别对这两个隔离系统进行优化控制。在本文研究的系统中，储能装置靠近MMC2的位置，那么对于左边的隔离系统，功率满足自平衡关系，无须优化，MMC1的有功类控制采用定直压控制模式，无功类控制采用定无功功率控制模式。对于右边的隔离系统，以线路5需要检修为例进行分析，优化模型中不包含左端隔离系统的电气量，则优化目标函数变为

$$W_{\text{loss}} = \sum_{t=0}^T (I_{2,t}^2 R_2 + I_{6,t}^2 R_6 + I_{7,t}^2 R_7) \Delta t \quad (6)$$

则式(2)的约束简化为

$$\begin{aligned} I_{2,t} &= (\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}) / U_2 \\ I_{6,t} &= -(PL3_t + P_{\text{VSC}}) / U_{\text{DC}} \\ I_{7,t} &= I_{6,t} - (P_{\text{Stor}} + P_{\text{DCSST}}) / U_{\text{DC}} \\ I_{7,t} &= -(P_2 - P_{\text{MMC2}}) / U_{\text{DC}} \end{aligned} \quad (7)$$

式(4)、式(5)分别简化为

$$S_{2,\min} \leq S_{2,t} \leq S_{2,\max} \quad (8)$$

$$\Delta U_{2,\min} \leq \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_2} \leq \Delta U_{2,\max} \quad (9)$$

MMC2的有功类控制切换为定直压控制模式，求解出的指令值只用于控制储能装置。

3.3 功率支援运行

当系统处于功率支援运行方式时，系统在满足配电要求的同时，还需要向被支援的一端传输确定大小的有功功率 P_{aid} 。此时优化问题的约束条件中需要增加一个有功功率的约束方程（假设SYS2为被支援端），即

$$P_2 = P_{\text{aid}} \quad (10)$$

同理，此时的待优化量只有储能装置的功率 P_{Stor} ，求解出的指令值只用于控制储能装置。

3.4 STATCOM运行

当系统处于STATCOM运行方式时，两端换流站只与交流系统交换无功功率，充当STATCOM的作用。此时，其定有功功率控制的参考值设为0；无功类控制以实际交流系统需求的无功功率为参考值，采用常规的定无功功率控制模式。

综上所述可知，当MMC配电系统处于不同的运行方式时，适当改变控制策略可以实现多种运行方式的自由切换。根据不同运行方式下的优化方程，通过包含精英策略的遗传算法进行求解，可得到SYS1有功功率 P_1 和储能装置功率 P_{Stor} 的参考值。将该数值送到换流站外环控制器的功率参考值和储能装置充放电的功率参考值，便可实现最小网损控制的目的。图4为最小网损控制策略的总体结构图。

4 仿真算例

按照图1的拓扑结构，在PSCAD/EMTDC仿真

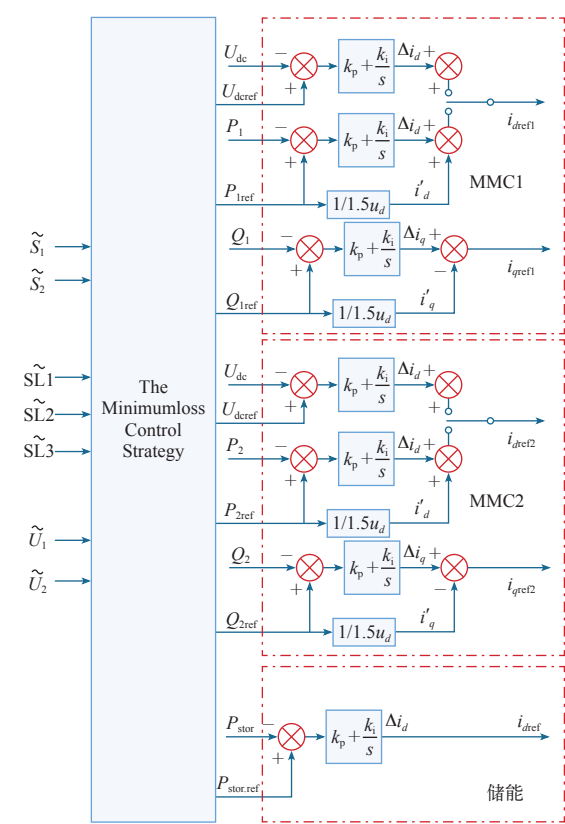


图4 最小网损控制策略总体结构

平台上搭建25电平MMC直流配电网仿真模型进行时域仿真。在本模型中，SYS1、SYS2输电阻抗分别为 $Z_1 = 10.5 + j38.31 \Omega$ ； $Z_2 = 8.4 + j30.77 \Omega$ 。直流配电系统线路长度及其电阻如表3所示，配电网在某24 h的有功功率需求如表4所示。图4中，控制内环采用 dq 轴电流解耦控制；各换流站之间采用主从控制策略。

表3 直流线路的参数

线路序号	线路长度/km	线路电阻/ Ω
1-3	5.7	0.161 31
3-4	2.2	0.062 26
4-5	2.0	0.056 60
5-6	2.0	0.056 60
6-2	4.6	0.130 18

在系统处于正常运行情况时，利用最小网损策略求解出SYS1的有功功率 P_1 和储能装置的功率 P_{stor} 。应用最小网损控制策略前后，该系统在各时间段的网损情况如图5、图6所示。

在图5、图6中，每个柱形的面积代表在该时间段的有功损耗，柱形的总面积代表该系统在

表4 有功功率的需求

时间	PL1/MW	PL2/MW	PL3/MW
0	7.222 2	2.730 6	0.092 1
1	6.964 3	2.494 1	-0.496 5
2	6.551 6	2.098 2	-1.984 7
3	6.190 5	1.997 1	-2.847 9
4	6.035 7	2.001 8	-3.162 0
5	5.829 4	1.863 5	-3.515 9
6	5.777 8	0.676 2	-3.750 7
7	6.087 3	0.261 0	-3.122 3
8	8.047 6	0.830 8	-1.029 0
9	11.555 6	1.103 9	2.449 9
10	12.484 1	1.222 8	4.334 9
11	13.000 0	1.625 0	6.097 6
12	12.277 8	2.029 5	7.493 2
13	12.381 0	1.031 1	8.548 2
14	12.587 3	1.179 1	9.292 3
15	12.896 9	1.935 4	9.432 8
16	12.793 7	1.712 5	9.255 9
17	12.380 1	1.762 4	8.645 8
18	10.317 5	1.964 4	6.570 7
19	9.079 4	2.447 6	5.423 2
20	8.976 2	3.112 2	5.246 2
21	8.769 8	3.674 7	4.794 8
22	7.944 4	3.399 5	3.574 5
23	7.428 6	3.051 5	1.811 8

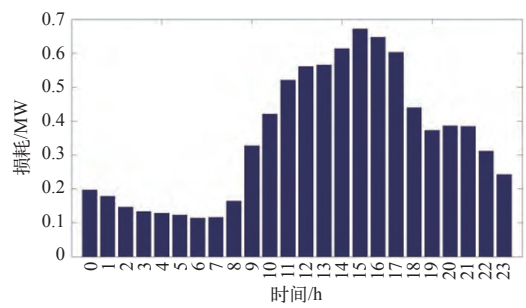


图5 优化前系统在各时间段的网损情况

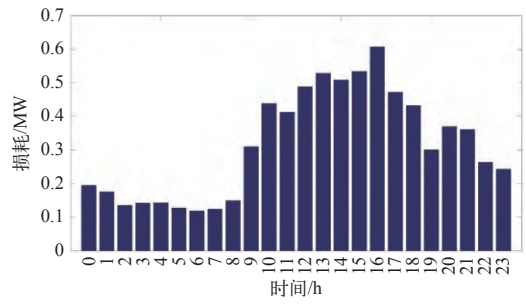


图6 优化后系统在各时间段的网损情况

24 h内的有功损耗。对比两图可知,施加优化策略前后,系统在各时间段的有功损耗发生相应变化,这表明该优化策略可以改变潮流分布。进一步计算两图柱形的总面积,其中优化前的 $W_{\text{before}} = 8.3558 \text{ MW}\cdot\text{h}$,优化后的 $W_{\text{after}} = 7.5721 \text{ MW}\cdot\text{h}$,显然施加该优化策略后,系统在24 h内的能量损耗大大降低,这也验证了该优化策略可以使系统的潮流分布和能量调配更加合理。

该优化策略中包含对交流母线电压的约束,因此需要进一步观察该策略对电压的影响情况。图7为优化前后交流电压的变化情况,其中优化前1、优化后1分别表示优化前后交流母线1的电压;优化前2、优化后2分别表示优化前后交流母线2的电压。分析可知,施加优化策略前后,交流母线电压无明显变化,完全满足要求,因此该控制策略不会影响到交流母线电压的稳定性。

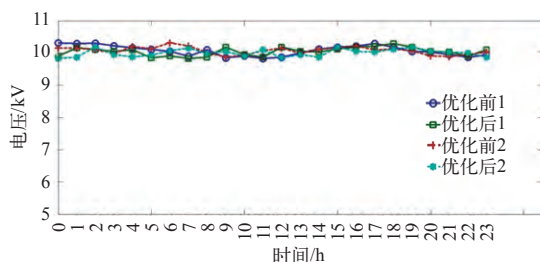


图7 优化前后系统交流电压波形

综上所述可知:该优化控制策略可以在维持交流电压稳定的情况下,有效减小MMC配电网的输配电损耗。

5 结束语

本文针对柔性直流配电系统,根据系统的运行特性提出了最优潮流控制策略,并通过时域仿真进行了分析验证,结论如下:

- 1) 本文所提出的最小网损控制策略可以减小MMC-DCDS的损耗,提高电网运行的经济性。
- 2) 最小网损控制策略不会影响配电网的电压稳定性。
- 3) 通过合理切换控制策略,可实现不同运行方式下MMC-DCDS的经济稳定运行。

参考文献

- [1] Allebrod S, Hamerski R, Marquardt R. New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission [C]. Power Specialist Conference, 2008.
- [2] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]. IEEE Bologna Power Technology Conference Proceedings Bologna, Italy, 2003: 1-6.
- [3] Franquelo L G, Rodriguez J, Leon JI, et al. The age of multilevel converters arrives [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2008, 2 (2): 28-39.
- [4] 徐政,屠卿瑞,裘鹏.从2010国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J].高电压技术,2010,36(12):3070-3077.
- [5] 闫景信.轻型直流输电在城市电网中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2008.
- [6] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].电机工程学报,2013,33(25):9-19.
- [7] 宋健.含柔性直流输电系统的潮流计算方法研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [8] 邓健俊.含柔性直流输电的交直流系统潮流优化控制方法研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [9] 邓健俊,文安,魏承志,等.含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):118-123.
- [10] 马春明,代磊.多端柔性直流输电经济性问题研究[J].电工电气,2015(2):22-26.
- [11] 季舒平.上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [12] 赵岩,郑斌毅,贺之渊.南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J].南方电网技术,2012,6(6):6-10.
- [13] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等.舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J].高电压技术,2014,40(8):2490-2496.

(收稿日期:2015-06-04) EA