

含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法

邓健俊^{1,2}, 文安^{1,3}, 魏承志³, 寻斌斌¹, 田霖³, 邓旭¹

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;
3. 南方电网电力调度通信中心, 广东 广州 510623)

摘要: 基于电压源换流器的高压直流输电技术, 即柔性直流输电技术是近年来高压直流输电研究和应用的热点。但含柔性直流输电的交直流并列系统会使得电网的潮流分布更趋复杂。由于柔性直流输电系统能够实现有功无功的独立控制, 对其有功功率指令值的分析有利于提高交直流并列系统的功率输送效率和效益。然而, 目前电力调度中, 该有功功率指令值的制定缺乏依据, 为此提出了一种计及多目标的有功潮流优化方法。通过计及多个目标的约束, 建立了相应的目标函数, 利用模糊理论, 给各个目标函数指定隶属函数, 最终求解多目标优化函数得到交直流并列系统的有功潮流分配优化值。最后通过算例验证了所提方法的可行性。相比当前常常依据运行方式和运行经验笼统地制定有功功率指令值的做法, 所提的多目标优化方法给出的指令值既能降低电网损耗, 又保证了电网运行的安全稳定性。

关键词: 柔性直流输电; 交直流并列系统; 输送功率分配; 多目标优化; 有功功率指令值

An optimization method for active power flow in AC/VSC-HVDC parallel transmission systems

DENG Jian-jun^{1,2}, WEN An^{1,3}, WEI Cheng-zhi³, XUN Bin-bin¹, TIAN Lin³, DENG Xu¹

(1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Dispatching Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Voltage source converter (VSC) based HVDC is a hotspot in the study and application of HVDC in recent years. However, the AC/VSC-HVDC parallel transmission system has made the distribution of the power flow more complex in the power networks. As VSC-HVDC can control its active and reactive power flow independently, it would be useful to improve the efficiency of the AC/DC parallel transmission system by studying the optimal power flow in parallel AC/DC systems. This paper presents a multi-objective optimization method for active power flow in parallel AC/DC transmission systems. The objective functions are established considering the constraints of multiple objectives. Based on the fuzzy theory, the objective functions are specified to their corresponding membership functions, and then the optimal assigned value of active power of the AC/DC parallel transmission system can be found out. Finally, the result of the calculation example verifies the feasibility of the proposed method. Compared to the method of setting the active power flow in the AC/DC parallel system based on operating mode and operating experience, the multi-objective optimization method can not only reduce the network losses but also ensure the safety and stability of the operation of the AC/DC parallel power systems.

Key words: VSC-HVDC; AC/DC parallel transmission system; transmission power allocation; multi-objective optimization; active power reference

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0118-06

0 引言

柔性直流输电(Voltage-Sourced Converter based HVDC, VSC-HVDC)是一种新型的输配电技术, 它

以 IGBT 全控电力电子器件和 PWM 技术为核心, 与常规 HVDC 相比, 柔性直流输电具有有功/无功的独立解耦控制、开关器件可以自关断而无换相失败问题、潮流翻转不需要改变电压极性等诸多优点, 更是可以连接弱交流系统或无源网络, 因此目前广受关注和应用^[1-5]。其主要应用在: 连接电网与小容

基金项目: 广东省第三批领军人才专项(SEPRI-K131003)

量远距离的分布式发电, 如风力发电等; 给偏远地区供电、海上供电; 城市输电网增容改造; 提高配电网电能质量; 电力市场环境下电力供应商之间的交易; 交流电网的非同步联接以及一些需要考虑电压支撑和美化环境等场合。

柔性直流输电系统的有功功率类控制主要包括定直流电压控制、定有功功率控制和定频率控制^[6]。利用 VSC-HVDC 技术进行输电时, 一般运行情况下, 必须保证至少有一端换流器采用定直流电压控制, 其余的换流器可采用定有功功率控制方式。在交直流并列系统中, 虽然交直流线路输送的总功率可以根据调度需求确定, 但是在交直流线路之间的输送功率分配却缺乏一定依据。调度运行中往往只根据运行经验进行功率分配, 因此难以预测其分配方案的效益及带来的后果。实际上, 柔性直流输电系统的输送功率是可控的, 也即是说只要确定其有功功率控制指令值 P_{ref} 即可确定交直流线路间的功率分配。

从国内外文献来看^[7-10], 现有的柔性直流输电控制理论研究重点主要集中在换流器控制策略及其改进的方面, 都没有涉及具体控制手段中功率控制指令值的确定方法。文献[11]中提出通过配合频率辅助控制器, 跟踪风电场的出力变化, 使得有功功率指令值与风电场出力保持一致。其做法增加了控制器的复杂性, 同时仅考虑用直流系统输送功率, 送电可靠性被削弱。交流输电和直流输电各具优势, 在交直流并列运行情况下, 如何在交直流线路中进行有功功率的合理分配输送, 在经济、安全等多种效益上达到更优, 其考虑显然很有必要。实际上, 如果换流器的 P_{ref} 设置过低, 就不能充分地利用柔性直流输电技术在输电能力、直流线路低损耗、输送功率可控等优势; 相反, 如果换流器的 P_{ref} 设置过高, 则可能出现交直流线路输送功率流向相反的情况(称为“并列环流”), 不利于正常电力调度, 一定程度上加大了直流设备发生故障的几率等。强直弱交或者强交弱直的传输容量分配比例都可能导致交直流系统的自组织临界性较强, 发生大停电事故的可能性较大^[12]。因此, 保证交直流线路传输容量一定程度上的均衡分配, 进行合理的有功功率指令值的确定方法研究很有必要。

本文提出了一种含柔性直流输电的交直流并列系统的多目标有功潮流优化分配方法, 该方法计及了多种目标条件的约束, 并以隶属度函数反映对各约束的重视和需求程度。通过求解多目标优化函数, 得到柔性直流输电系统交直流并列运行下最优的有功功率控制指令值。为交直流并列系统中的输送功

率分配提供了一种科学有效的方法, 为工程运行方案的制定提供了依据。

1 计及多目标约束的有功功率函数

含 VSC 的交直流并列运行系统基本原理如图 1 所示。正常运行情况下, 直流系统会有与之并列的交流线路共同承担输送任务, 这样能有效地提高功率输送的可靠性。在图 1 的交直流并列系统中, 要将大小为 P_w 的功率由 AC Grid2 端输送到 AC Grid1 端, 换流器 VSC1 采用定直流电压控制方式, 换流器 VSC2 采用定有功功率方式。若不计联结变压器等损耗, 则可以认为 P_{dc} 等于换流器 VSC2 的有功功率指令值 P_{ref} 。显然, P_{ac} 和 P_{dc} 的合理分配是提高该交直流并列系统运行效率的关键。

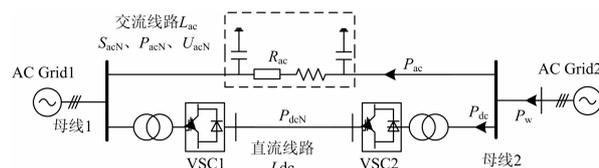


图 1 含 VSC 的交直流并列运行系统基本原理图

Fig. 1 Diagram of AC/VSC-HVDC parallel transmission system

1.1 计及输电损耗的目标函数

有功功率指令值不同时, 输电损耗的差异主要由母线 1 和母线 2 之间的交流线路的损耗 ΔP_{ac} 和直流系统的损耗 ΔP_{dc} 造成。交流线路的损耗 ΔP_{ac} 主要是指交流输电设备的损耗, 包括交流线路和交流变压器等的损耗等; 直流系统的损耗 ΔP_{dc} 主要包括: 换流器及其辅助设备的损耗、直流输电线路损耗、联结变压器损耗、直流电抗器损耗以及滤波器损耗等。对于已建好的交直流并列系统, 交直流线路的输电损耗主要与输送功率有关。

交流线路中由线路等效电阻 R_{ac} 产生的损耗 ΔP_{ac} 为

$$\Delta P_{ac} = \frac{P_{ac}^2 + Q_{ac}^2}{V_{ac}^2} R_{ac} \quad (1)$$

其中: P_{ac} 和 Q_{ac} 分别为交流线路传输有功功率和无功功率; V_{ac} 为交流电压。

直流系统输送功率时, 直流系统产生的损耗与其传输功率的关系为非线性, 可用式(2)表示。

$$\Delta P_{dc} = g(P_{dc}) \quad (2)$$

对于具体的给定直流系统, 其损耗都可以通过 P_{dc} 与各元件的函数关系得到, 具体表达式根据工程计算精度要求而定。在柔直工程建设规划阶段也可

以评估出换流系统的总损耗，约为额定容量的1%~3.6%^[6]。

因此，交直流输电总损耗 $f_{\Delta P}$ 最小的交直流系统输送功率分配目标函数为

$$\min f_{\Delta P} = \sum_{i=\text{ac,dc}} \Delta P_i \quad (3)$$

1.2 规避并列环流运行情况的输送功率约束

如图1中，若在交直流系统传输功率过程中，输送功率 P_{ac} 和 P_{dc} 的方向相反，称此情形为交直流运行的“并列环流”。“并列环流”不仅会增加不必要的线路损耗，而且给电力调度带来很大难度，不利于电网运行稳定。为了最大限度规避并列环流的出现，交直流线路上的输送功率应满足：

$$\min f_{\text{para.}} = r(P_{\text{ac}}, P_{\text{dc}}) \quad (4)$$

式中， $r(P_{\text{ac}}, P_{\text{dc}})$ 是关于交直流线路规避并列环流的约束函数，可根据具体网架的潮流方程得到，但显然应保证 $P_{\text{w}} \geq P_{\text{dc}}$ 。

1.3 设备利用率的目标函数

电网元件的设备利用率是元件承载功率占额定功率的百分比，可以衡量设备的利用程度。电网设备的合理利用，不但有助于电网的安全与稳定运行，充分发挥资产的价值，还可以减少重载与轻载的比率，增强电网的稳定性，延长变压器等元件的使用寿命。交直流并列输电系统中，既不应该只使用交流线路输送功率，也不应该因为直流系统的灵活性和稳定性而只使用直流线路输送功率，交流线路和直流线路的合理分配输送功率，才能在最大程度地提高两者的设备利用率 η_{dc} 和 η_{ac} 的同时，保证线路最大的输送裕度。这里采用设备均衡利用率^[13]的概念，因此，设备利用率约束下的交直流线路输送功率目标函数用 f_{η} 表示为

$$\min f_{\eta} = \sum_{i=\text{ac,dc}} A_i \eta_i = \sum_{i=\text{ac,dc}} A_i \frac{P_i}{S_i \times C_i} \quad (5)$$

其中： S_i 为各个元件的额定容量或短时间内可以过载运行的极限容量； C_i 为均衡状态下的各个元件的均衡效率； A_i 表示对直流线路和交流线路的均衡利用率的需求度， $0 \leq A_i \leq 1$ 且 $A_{\text{dc}} + A_{\text{ac}} = 1$ 。由此得出的 $\min f_{\eta}$ 值表示在满足设备利用率要求下的交流和直流设备利用率最优值。

1.4 元件故障率的目标函数

根据运行经验，设备出现故障的可能性与负载率有关，如IGBT等电力电子器件，其运行的负载率越高，趋向出现的故障次数也就越多。直流设备和交流设备不同负载率下的故障次数也有所不同，

合理地分配交直流系统的输送功率，可以有效地降低交直流并列系统的总体故障率。设元件负载率为 λ 时，其趋向故障次数为 t ，用相关函数表示为 $t=g(\lambda)$ 。因此，由元件故障率 f_{λ} 最小约束下的交直流系统输送功率优化目标函数为

$$\min f_{\lambda} = \sum_{i=\text{dc,ac}} g(\lambda_i) \quad (6)$$

其中

$$\lambda_i = \frac{P_i}{P_{\text{IN}}} \times 100\%, i=\text{ac, dc} \quad (7)$$

式中， P_{IN} 为交流线路和直流系统的额定输送功率。

1.5 电网稳定性的目标函数

一般对于交直流并列输电系统，直流系统输送功率要比交流线路大，所以一旦直流系统发生故障，较大容量的功率将会转移到并列的交流输电电路上，很容易导致交流系统失稳。用 ψ_{ac} 衡量交流线路在直流功率向交流线路转移过程中能够承受的冲击能力^[14]

$$\psi_{\text{ac}} = \frac{P_{\text{dcN}}}{P_{\text{aclimit}} - P_{\text{ac}}} \quad (8)$$

式中： P_{aclimit} 为交流线路的暂态稳定输送功率极限； P_{dcN} 为直流系统的额定输送功率。

记直流系统故障情况下功率转移对交流通道的冲击率为 Γ ，则

$$\Gamma = \frac{K_{\text{dc} \rightarrow \text{ac}} (P_{\text{w}} - P_{\text{ac}})}{P_{\text{acN}}} \quad (9)$$

式中： $K_{\text{dc} \rightarrow \text{ac}}$ 表示直流系统故障情况下功率转移效率， $0 \leq K_{\text{dc} \rightarrow \text{ac}} \leq 100\%$ ； P_{acN} 为交流线路额定输送功率。

显然，上述两个指标都与直流系统的输送功率相关，用 $G_{\psi}(P_{\text{dc}})$ 和 $G_{\Gamma}(P_{\text{dc}})$ 分别表示上述两个指标对系统冲击程度的影响效果， $f_{\text{stab.}}$ 表示故障情况下系统的受冲击总程度。因此，计及电网稳定性的交直流系统输电功率目标函数为

$$\min f_{\text{stab.}} = [G_{\psi}(P_{\text{dc}}) + A_{\text{stab.}} G_{\Gamma}(P_{\text{dc}})] \quad (10)$$

式中， $A_{\text{stab.}}$ 表示指标 Γ 相对于指标 ψ_{ac} 的重要性因子， $A_{\text{stab.}} \geq 0$ 。

2 有功功率的多目标优化模型及其求解

结合式(3)~式(6)、式(10)，可得计及系统损耗、设备利用率、元件故障率、电网稳定性以及规避并列环流的多目标优化函数模型为

$$\min F(P_{\text{ac}}, P_{\text{dc}}) = (f_{\Delta P}, f_{\text{para.}}, f_{\eta}, f_{\lambda}, f_{\text{stab.}}) \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} h(P_{ac}, P_{dc}) = P_w - P_{ac} - P_{dc} = 0 \\ P_{i_low} \leq P_i \leq P_{i_high}, i = ac, dc \end{cases} \quad (12)$$

其中: P_{i_min} 为线路允许输送功率下限; P_{i_max} 为线路允许输送功率上限。由式(11)、式(12)决定的 P_{dc} 即为多目标下的有功功率优化指令值, 可记为 P_{dc_opt} 。该多目标优化模型可以采用模糊理论进行求解。

利用模糊理论对该函数模型求解, 主要是通过目标函数(11)和约束条件(12)进行模糊化处理^[15]。目标函数的模糊化是指根据决策者要求达到的满意度, 构建可以作为模糊评价指标的目标函数的隶属度函数, 隶属度函数可以有效地将不同量纲的目标进行比较和组合, 从而得到计及多目标函数的综合解。约束条件的模糊化是指求解处理中采用软约束条件, 即在必要时允许一定程度的溢出约束条件范围。

根据决策者需求, 给每个目标函数指定一个隶属度函数 $\mu_j(f_j(u))$, 用以反映对目标函数 $f_j(u)$ 的满意度, 目标值越优, 满意度越高。根据上述五个目标函数的指标特点, 可以认为反映损耗和故障率的指标属于固定型^[16], 即越接近零值越好, 而其它三个目标函数属于成本型, 即其值越小越好。当五个目标函数反映的总满意度最大时, 则可以认为此时的解为最优。用 $\mu(F(P_{dc}))$ 表示总的满意度函数, 则式(11)对应的隶属度优化函数为

$$\max \mu(F(P_{dc})) = \sum_{j=1}^5 \varepsilon_j \mu_j(f_j(P_{dc})) \quad (13)$$

其中: $j=1,2,\dots,5$ 时, f_j 分别对应目标函数 $f_{\Delta P}$ 、 f_{para} 、 f_{η} 、 f_{λ} 、 f_{stab} ; ε_j 为各子隶属度函数的权重系数, 能够反映各约束条件的受重视程度。式(13)的解即为 P_{dc_opt} 。

上述优化算法的求解流程可以用图 2 表示。

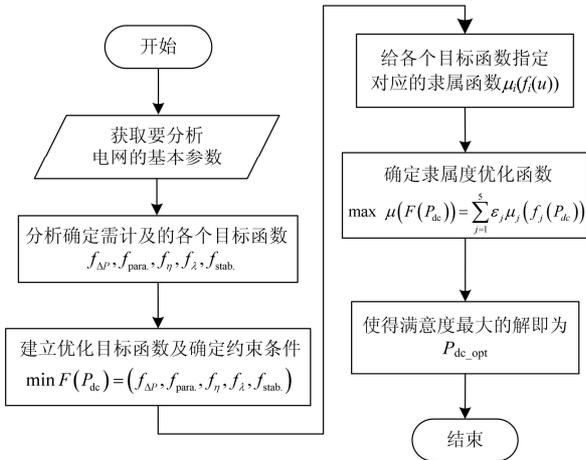


图 2 优化算法的求解流程图

Fig. 2 Flow chart of the optimization algorithm

3 算例分析

以柔性直流输电系统连接交流系统和风电场为例, 即图 1 中 AC Grid2 为风电场, 交直流系统主要负责将风电场的功率输送到电网中。正常情况下, 换流器 VSC2 采用定有功功率控制方式, 换流器 VSC1 采用定制直流电压控制方式。其中直流系统中的连接变压器为 110 kV/160 kV、240 MVA。换流器阀开关采用梯形波调制, IGBT 器件开关频率为 500 Hz。风电场额定功率为 $P_{wN}=180$ MW。线路其他参数见表 1。

表 1 线路基本参数

Table 1 Parameters of the transmission lines			
交流线路基本参数			
额定有功功率/MW	200	输送功率极限/MW	250
额定电压/kV	110	线路总长度/km	30
线路电阻/ Ω	0.132	功率因数	0.98
直流系统基本参数			
额定输送容量/MW	200	线路总长度/km	30
有功调节范围/MW	-200~200	额定电压/kV	± 160
无功调节范围/Mvar	-50~100	直流系统总损耗百分比	1.6%

记 $P_{dc}=x$, $P_w=y$, $\mu(F(P_{dc}))=z$ 。由于此时 VSC2 向 VSC1 输送功率, 因此, $x \in [0, 200]$, $y \in [0, 180]$ 根据式(3)以及文献[16]中固定型隶属函数定义, 可得关于输电损耗的隶属度函数为

$$\mu(f_{\Delta P}) = -\frac{0.000341x^2 - (0.000682y - 0.016)x}{0.000341y^2} \quad (14)$$

并列环流出现主要是由于有功功率指令值设置过大, 因此, 规避并列环流时的目标函数可以表示为

$$f_{para} = |P_{dc}|, (|P_w| \geq |P_{dc}|)$$

此目标函数为成本型, 对应的隶属函数为

$$\mu(f_{para}) = 1 - \frac{f_{para}}{f_{para_min} + f_{para_max}} = 1 - 0.005x \quad (15)$$

设直流线路和交流线路的均衡效率 $C_{dc}=0.6$ 、 $C_{ac}=0.7$, 对直流线路和交流线路的均衡利用率的需求度分别为 $A_{dc}=0.55$, $A_{ac}=0.45$ 。则交直流线路总设备利用率为

$$f_{\eta} = \sum_{i=dc,ac} A_i \eta_i = 0.00143x + 0.00315y$$

此目标函数为成本型, 对应的隶属函数为

$$\mu(f_{\eta}) = 1 - \frac{f_{\eta}}{f_{\eta_min} + f_{\eta_max}} = 1 - \frac{0.00143x + 0.00315y}{0.0063y + 0.286} \quad (16)$$

故障次数与元件负载率有关, 设 $t_{ac}=\lambda_{ac}\times 5$, $t_{dc}=\lambda_{dc}\times 10$, 则交直流线路总故障次数为

$$f_{\lambda} = \sum_{i=dc,ac} g(\lambda_i) = 0.025x + 0.025y$$

此目标函数为固定型, 对应的隶属函数为

$$\mu(f_{\lambda}) = 1 - \frac{0.025(x+y)}{0.025y+5} \quad (17)$$

关于稳定性的目标函数, 属于成本型, 取 $K_{dc\rightarrow ac}=100\%$, $A_{stab.}=1$, 根据式(8)~式(10)其对应的隶属函数为:

$$\mu(f_{stab.}) = 2 - \frac{x}{200} - \frac{(y-250)(y-450)}{(700-2y)(250+x-y)} \quad (18)$$

对目标函数 $f_{\Delta P}$ 、 f_{para} 、 f_{η} 、 f_{λ} 、 $f_{stab.}$ 分别给定满意度系数为: 0.30, 0.05, 0.05, 0.20, 0.40。则由式(13)~式(18)可得函数 $z=\mu(F(P_{dc}))$ 的表达式, 由于篇幅限制这里不再列出, 其函数图象如图 3 所示。

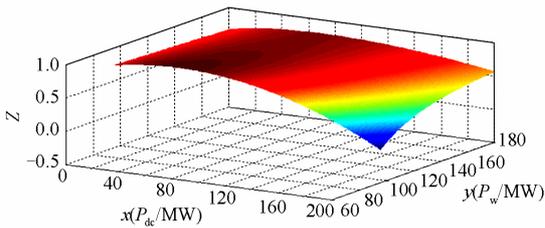


图 3 隶属度优化函数图象

Fig. 3 Graph of membership optimization function

由图 3 可看出, 风电场出力较大时, 换流器有功功率指令值也应该相应地调大; 在大多数情况下, 最优有功功率指令值都不是直流系统的最大输送功率值, 因此应该根据风电场出力情况, 在考虑目标约束的情况下确定最优指令值。

当风电场出力 $y=120$ MW 时,

$$z = -2.083 \times 10^{-5} x^2 + 1.262 \times 10^{-3} x - \frac{37.304}{x+130} + 1.007 \quad (19)$$

对应函数图象如图 4, 总满意度 z 取得最大值时, $P_{dc,opt}=56.2$ MW。

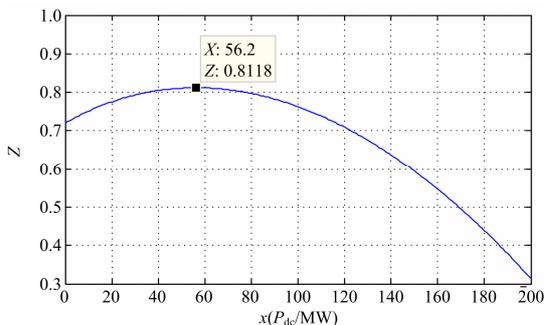


图 4 隶属度优化函数图象($P_w=120$ MW)

Fig. 4 Graph of membership optimization function($P_w=120$ MW)

4 结语

本文提出的多目标有功潮流优化方法, 为含柔性直流输电的交直流并列系统输送功率的分配方案制定提供了科学合理的依据, 有效地提高了柔性直流输电接入后的电网功率输送效率和效益, 同时保证了电网的安全稳定运行。算法中采用了隶属函数, 能够有效地反映运行人员对各约束条件的重视和需求程度, 使得所求的结果科学合理, 特别地, 当对应的隶属度函数的权重系数取零值, 则表示不考虑该约束条件。另外, 虽然算法中涉及多目标的约束, 优化目标函数相对复杂, 但是对于既定的具体电网, 目标函数中的各项参数都能够具体给定, 因此其多目标优化函数实际上只是一个关于 P_w 和 $P_{dc,opt}$ 的函数关系(如图 3)而已, 通过编定程序, 便能直接根据前者得到优化结果, 应用性较强。

参考文献

- [1] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.
TANG Guang-fu, HE Zhi-yuan, TENG Le-tian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44.
- [2] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
WEN Jun, ZHANG Yi-gong, HAN Min-xiao, et al. HVDC based on voltage source converter——a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51.
- [3] 杨用春, 赵成勇. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 31-35.
YANG Yong-chun, ZHAO Cheng-yong. Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 31-35.
- [4] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-65.
LI Huan-ping, YANG Jin-ming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 62-65.

- [5] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 594-599.
- [6] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] 张静, 徐政, 潘武略. VSC-HVDC 系统新型广义直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 46-50.
ZHANG Jing, XU Zheng, PAN Wu-lue. A novel generalized DC voltage control strategy for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 46-50.
- [8] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [9] PINTO R T, BAUER P, RODRIGUES S F, et al. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2429-2440.
- [10] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.
HU Peng-fei, JIANG Dao-zhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.
- [11] 范心明, 管霖. 多电平柔性直流输电定有功功率与频率辅助控制[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 182-186.
FAN Xin-ming, GUAN Lin. Constant active power and frequency auxiliary control for multilevel VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 182-186.
- [12] 屠竞哲, 甘德强, 于洋, 等. 直流输电对交直流互联系统自组织临界性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 7-12.
TU Jing-zhe, GAN De-qiang, YU Yang, et al. DC transmission impact analysis on AC/DC interconnected system self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 7-12.
- [13] 房晟辰. 配电网设备利用率评估方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [14] 徐政, 黄弘扬, 周煜智. 描述交直流并列系统电网结构品质的三种宏观指标[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 1-7.
XU Zheng, HUANG Hong-yang, ZHOU Yu-zhi. Three macroscopic indexes for describing the quality of AC/DC hybrid power grid structures[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 1-7.
- [15] 李智欢. 无功优化进化计算的局部搜索策略及多目标处理方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [16] 韩正伟, 林锦国, 邵如平. 模糊多目标决策理论在电能质量综合评价中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(10): 33-36.
HAN Zheng-wei, LIN Jin-guo, SHAO Ru-ping. Application of fuzzy multi-objective decision making theory in synthetical evaluation about power quality[J]. Relay, 2007, 35(10): 33-36.

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-10-29

作者简介:

邓健俊(1988-), 男, 通讯作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制、柔性直流输电控制与保护; E-mail: jackyjun@foxmail.com

文安(1965-), 男, 博士, 中央“千人计划”专家, IET Fellow, 主要从事在电力系统保护、控制、生产运行、研究开发等工作; E-mail: wenan@csg.cn

魏承志(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事柔性直流输电技术、电能质量分析与控制等方面研究工作。