

基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统潮流算法研究

牛博彦, 胡林献, 张众

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 柔性直流输电系统非常适合海上风电场并网, 但传统交/直流混联系统潮流算法在计算基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统潮流时存在缺陷: 直流系统移开后, 风电场交流节点变为孤立节点, 剩余交流系统的雅可比矩阵不可逆, 迭代过程无法进行。针对这一缺陷提出了一种含 VSC-HVDC 的混联系统 (AC/VSC-HVDC) 潮流解耦算法: 该算法将交、直流系统进行解耦, 分别迭代计算。所提算法克服了目前交/直流混联系统潮流计算方法存在的对交流潮流计算程序继承性差、扩展变量多、计算速度慢等缺点; 也解决了风电场 VSC-HVDC 并网系统潮流算法中存在的问题。通过标准算例的计算验证了所提方法的有效性, 可以用来对风电场直流并网系统进行稳态潮流分析。

关键词: 风电场并网; 电压源换流器; 交流/直流混合系统; 潮流计算; 交直流解耦

Research on power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC

NIU Bo-yan, HU Lin-xian, ZHANG Zhong

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: Flexible HVDC system is very suitable for offshore wind farm grid-connection, but when traditional AC-DC power flow algorithm is used to calculate the power flow of grid-connected wind farm based on VSC-HVDC, once removing the DC system, the wind farm becomes isolated communication node, thus the Jacobi matrix of communication system will not be irreversible and iterative process can't be continued. Aiming at these defects, this paper proposes a AC/VSC-HVDC power flow decoupled algorithm containing VSC-HVDC, by which the AC system and DC system are decoupled and computed iteratively. This algorithm overcomes the shortages of existing AC/DC hybrid system power flow calculation algorithm, such as bad inheritance to AC power flow calculation program, much expansion variables, slow calculation speed, and so on, and solves the problem of wind farm VSC-HVDC grid-connected system power flow algorithm. Calculation of standard examples verify that the proposed algorithm is valid and can be used for steady-state power flow analysis of wind farm DC grid-connected system.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A105).

Key words: grid-connected wind farm; voltage source converter; AC/DC hybrid system; power flow calculation; decoupling

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0006-06

0 引言

众所周知, 风能是高效的清洁能源, 分布广泛、成本低廉、发展迅速, 在分布式能源中占据重要地位^[1-2]。但我国的风电场大多位于远离负荷中心、电网结构较弱的偏远地区, 如我国西北地区或离岸海上风电场。随着风电场规模的扩大, 风电场对电网的稳态和暂态运行影响也越来越大, 其并网问题也就越来越重要^[3-6]。风电场的并网方式主要有常规

交流并网和基于电压源换流器的柔性直流并网。相比于常规交流并网, 基于电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的新一代高压直流输电技术 (VSC-HVDC) 具有向无源地区供电、有功功率和无功功率独立控制、运行方式灵活多变、提高交流系统稳定性、适合海上风电并网等优点, 因而被广泛应用于风电场并网^[7-12]。

潮流计算对于了解系统的稳态运行状态、分析系统静态稳定和暂态稳定十分有必要。目前, 含 VSC-HVDC 的混联系统潮流计算方法已有较多成果, 文献[13]研究了 VSC-HVDC 的稳态特性, 并提出了一种含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流交

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2011AA05A105)

替代求解算法;文献[14]则研究了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法,文献[15]中结合 VSC-HVDC 的控制特征对统一迭代算法进行了改进,降低了编程量,提高了计算速度。

统一迭代法、交替迭代法及其各种改进算法在计算时,都是先将 VSC-HVDC 直流系统分离出来,然后在换流站交流节点注入一个附加功率来等值^[16];但现有风电场一般只采用双端 VSC-HVDC 系统并网,直流系统移开后,风电场节点就成了孤立节点,剩余交流系统节点导纳矩阵中一行元素全为零,从而导致潮流雅可比矩阵不可逆,迭代计算无法进行。为了解决上述难题,本文首先根据 VSC-HVDC 网络方程及其控制方式将 AC/VSC-HVDC 混合系统解耦成独立的交流、直流子系统,然后结合风电场的控制方式与 VSC-HVDC 控制特性,分别对交、直流系统进行潮流计算。该算法同时克服了目前含 AC/VSC-HVDC 混合系统潮流计算方法存在的交流程序继承性差、代码编制量大、扩展变量多、计算速度慢等缺点,最后通过算例分析验证了本文算法的有效性。

1 含 VSC-HVDC 的混联系统潮流解耦算法

1.1 VSC 换流站的稳态模型

单端 VSC 换流站与交流系统的等效电路连接示意图如图 1 所示。

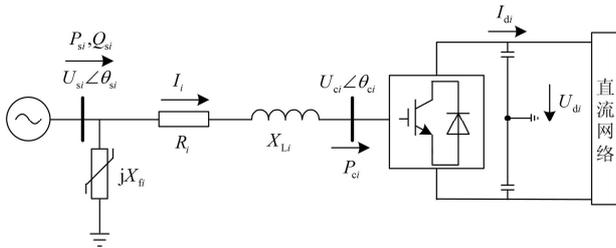


图 1 VSC-HVDC 交/直流系统连接示意图

Fig. 1 VSC connected to the AC/DC system

图中: X_L 为换流变压器阻抗; R_f 为换流器内部损耗等效电阻; U_d 为直流侧电压; U_c 为 VSC 的输出电压; U_s 是与 VSC 相连的交流母线电压, δ 为 U_s 、 U_c 之间的相角差; X_f 为交流滤波器等值电抗。

若忽略 VSC 换流站及换流变压器的等效电阻 R , 则交流系统注入 VSC 的功率可表示为^[11]

$$P_s = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{U_s}{X} (U_s - U_c \cos \delta) + \frac{U_s^2}{X_f} \quad (2)$$

VSC 换流站通常采用 PWM 控制, 通过式(1)、式(2)可以看出: VSC 换流站通过控制 δ 来间接控制 P_s , 通过控制调制度 M ($0 < M \leq 1$) 来间接控制 Q_s , 从而可以独立、灵活地控制有功功率和无功率^[12]。

VSC 的有功功率控制方式有定直流电压控制、定有功功率控制和定直流电流控制; 无功功率控制方式有定无功功率控制和定交流电压控制。但在 VSC-HVDC 柔性直流输电系统中, 直流电压的稳定与直流系统的正常工作以及换流站输出电压的稳定性密切相关, 因此逆变端的换流站通常采用定直流电压控制。

1.2 VSC-HVDC 直流网络方程

当按照图 1 所选的电流方向和功率方向为正时, 可以得到直流系统网络方程为

$$I_d = G \cdot U_d \quad (3)$$

式中, G 为所有直流网络的节点导纳矩阵。

1.3 交/直流系统解耦

假设 VSC-HVDC 柔性直流系统有以上三类换流器, 则直流子系统的直流网络方程为

$$\begin{bmatrix} I_{di}^{sp} \\ I_{dv} \\ I_{dp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{II} & G_{IV} & G_{IP} \\ G_{VI} & G_{VV} & G_{VP} \\ G_{PI} & G_{PV} & G_{PP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{di} \\ U_{dv}^{sp} \\ U_{dp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: 下标 V、I、P 分别表示 VSC 换流站采用直流电压、定直流电流、有功功率控制时的变量和参数; I_{dp} 由 P_{dp}^{sp}/U_{dp} 表示。

式(4)经变换可得

$$\begin{bmatrix} I_{di}^{sp} - G_{IV} U_{dv}^{sp} \\ -G_{VV} U_{dv}^{sp} \\ I_{dp} - G_{PV} U_{dv}^{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{II} & 0 & G_{IP} \\ G_{VI} & -1 & G_{VP} \\ G_{PI} & 0 & G_{PP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{di} \\ I_{dv} \\ U_{dp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

从式(5)可以看出: 直流系统的有功状态量与交流系统状态量无关, 仅与 VSC 换流站的控制方式和控制参数有关, 因此, 在 AC/VSC-HVDC 混联系统中可以实现交、直流子系统之间的完全解耦。

1.4 直流系统状态量计算

由式(5)可知, VSC 换流站所对应的方程线性与否取决于是否有 VSC 换流站采用了定有功功率控制方式; 若为非线性方程时, 可以先对直流系统方程进行高斯-塞德尔迭代计算, 再将收敛后的结果代入式(5), 即可求出 VSC 所对应的直流系统有功状态量, 并进而由式(6)求出各个 VSC 换流站的有功功率。

$$P_{di} = U_{di} I_{di} \quad (6)$$

1.5 交流系统状态量计算

1) 节点有功功率给定值修改

当忽略 VSC 及换流电抗器损耗时, 有

$$P_{si} = P_{ci} = P_{di} \quad (7)$$

只要 VSC 的给定值不变, P_{di} 和 P_{si} 就是常数,

因此, 可用 P_{si} 去修改与该 VSC 相连交流节点的有功功率给定值。

2) 节点类型转换或无功功率给定值修改

若 VSC 采用定交流电压控制方式, 则与该 VSC 相连交流节点类型转换为 PV 节点, 且其电压给定值等于 VSC 的交流电压给定值。

若 VSC 采用定无功功率控制方式, 且与该 VSC 相连交流节点类型为 PV 节点, 则该交流节点类型和电压给定值保持不变。

若 VSC 采用定无功功率控制方式, 且与该 VSC 相连交流节点类型为 PQ 节点, 则可用给定值 Q_{si} 去修改该交流节点的无功功率给定值。

3) 交流系统状态量计算

在不修改原交流潮流计算程序代码的情况下, 直接利用现有的任意一种纯交流潮流程序计算交流系统状态量及其注入 VSC 的无功功率 Q_{si} 。

1.6 控制变量计算

VSC 采用 PWM 控制时^[14]:

$$U_c = \frac{\mu}{\sqrt{2}} MU_d \quad (8)$$

式中, μ 为 PWM 的直流电压利用率 ($0 < \mu \leq 1$)。代入式 (1)、式 (2) 后:

$$\begin{cases} P_{si} = \frac{U_{si} \mu_i M_i U_{di}}{\sqrt{2} X_i} \sin \delta_i \\ Q_{si} = \frac{U_{si}}{X_i} (U_{si} - \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{di} \cos \delta_i) + \frac{U_{si}^2}{X_{fi}} \end{cases} \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_c$$

式中, n_c 为 VSC 的个数。

在 p_{si} 、 Q_{si} 已知的情况下, 迭代求解式 (9) 即可求出第 i 个 VSC 的控制变量 δ_i 和 M_i 。

2 风电场 VSC-HVDC 并网系统潮流计算

海上大型风电场与主电网系统的连接示意图如图 2 所示, 电压源换流站由 VSC 和换流站变压器组成^[13]。

风电场由于受风速波动的影响, 通常需要控制机端电压和有功功率, 所以风电场侧 VSC 换流站应控制交流电压和直流有功功率^[12]:

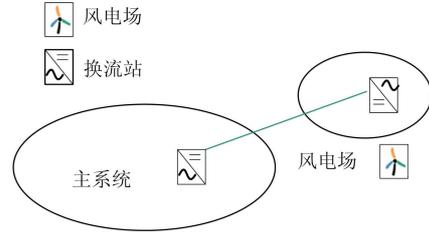


图 2 风电场与主系统连接示意图

Fig. 2 Wind farm connected to the AC system

$$U_s - U_s^{sp} = 0$$

$$P_d - P_d^{sp} = 0$$

风电场侧 P_d 的选取需考虑风力发电机组本身固有的特性, 风力发电机吸收的机械功率和异步发电机发出的电气功率理论上应该相等, 因此在忽略机械损耗的前提下, 可以将风电场的有功出力表示成风速的函数, 从而确定 P_d ^[17]。

$$P_d = 0.5 C_p \rho S V^3 \quad (10)$$

式中: S 为风机叶片扫掠面积; ρ 为空气密度; V 为风速; C_p 为风力机的风能利用系数, 它是叶尖速比 λ 的函数。其中 $\lambda = \omega r / V$, ω 为风轮角速度, r 为风轮半径。

移去 VSC-HVDC 直流系统后, 剩余的部分由原交流系统和风电场组成, 且两者无电气连接。考虑异步发电机的稳态特性, 风电场采用基于异步发电机简化等值电路的改进 P-Q 模型^[18], 图 3 为异步发电机等值电路图, 无功功率表示为

$$Q = V \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + X \frac{V + 2RP}{2(R^2 + X^2)} - \frac{X \sqrt{(V + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X^2)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (11)$$

式中: V 为风电机组的机端电压; P 为风电场的有功功率; X 为定子和转子的漏抗之和; R 为定子电阻和转子电阻之和; X_c 为风电场处电容器的电抗; X_m 为异步风电机组的激磁电抗。

异步发电机的电阻一般电抗值小很多, 通常可以忽略不计, 所以式 (11) 可以简化为^[18]

$$Q \approx V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + \frac{X}{V^2} P^2 \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可看出, 当异步发电机的有功功率是确定值时, 无功功率可以表示为机端电压的函数。若风电场侧 VSC 采用定交流电压控制方式, 则可以根据有功功率和交流电压给定值直接计算出

风电场无功功率,即可得到风电场侧 VSC 换流站的无功功率。

这样即可应用上一节交/直流混联系统潮流解耦算法将直流系统状态量、交流系统状态量、和 VSC 换流站控制变量都求出来。

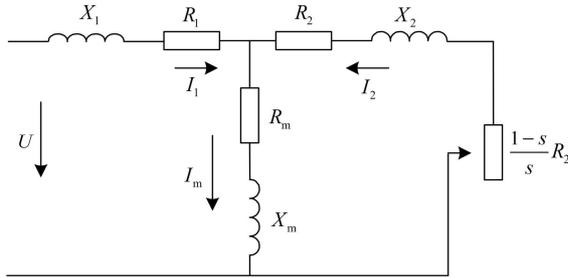


图 3 异步发电机等值电路图

Fig. 3 Asynchronous generator equivalent circuit

3 算例与分析

算例 1 由 IEEE-14 节点系统修改而来,系统结构如图 4 所示^[19]。VSC₁、VSC₂ 和 VSC₃ 分别连接于节点 12、13 和 14 上,参数为 $X_L=0.15$ 、 $R=0.006$ 、直流电阻 $R_d=0.03$ 、 $X_f=400$ 。VSC₁ 采用定直流电压($U_{d1}^{sp}=2.0000$)、定交流无功功率($Q_{s1}^{sp}=0.2099$)控制; VSC₂ 采用定直流有功功率($P_{d2}^{sp}=-0.3601$)、定交流无功功率($Q_{s2}^{sp}=0.0187$)控制; VSC₃ 采用定直流有功功率($P_{d3}^{sp}=-0.8663$)、定交流无功功率($Q_{s3}^{sp}=-0.0864$)控制。

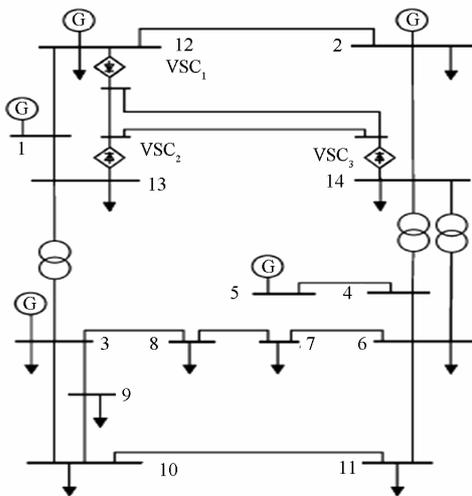


图 4 修改后的 IEEE-14 交/直流混联系统结构示意图

Fig. 4 The modified IEEE-14 nodes of AC/DC mixed system

表 1、表 2 和表 3 分别列出了统一迭代法和本

文含 VSC-HVDC 混联系统潮流快速解耦算法的交流子系统、直流子系统潮流计算结果及迭代次数和计算时间。

从交流子系统和直流子系统的计算结果可知:本文快速解耦算法与统一迭代法的误差不及千分之一,完全满足电力系统的计算精度要求,且本文算法所需时间比统一迭代法大大缩小,随着系统的增大,其迭代次数和计算时间的优势会越来越明显,是一种准确的 AC/VSC-HVDC 混联系统潮流方法。

表 1 算例系统 1 交流子系统计算结果

Table 1 Calculation results of the example system 1 AC subsystem

节点号	统一迭代法		本文快速解耦算法	
	幅值/p.u.	相角/(°)	幅值/p.u.	相角/(°)
1	1.060 0	0.0	1.060 0	0.0
2	1.010 0	-15.262 0	1.010 0	-15.205 7
3	1.070 0	-12.438 8	1.070 0	-12.415 6
4	1.054 8	-15.615 3	1.054 8	-15.573 7
5	1.090 0	-15.615 4	1.090 0	-15.573 7
6	1.032 8	-16.460 7	1.032 8	-16.422 1
7	1.030 8	-16.028 0	1.030 8	-15.992 2
8	1.045 5	-14.363 3	1.045 5	-14.333 8
9	1.055 3	-13.211 3	1.055 3	-13.187 2
10	1.046 0	-13.732 1	1.046 0	-13.706 8
11	1.019 8	-16.291 6	1.019 8	-16.258 7
12	1.010 2	-5.817 8	1.010 6	-5.759 6
13	1.010 6	-4.169 2	1.010 6	-4.157 8
14	1.032 4	-14.043 0	1.032 3	-13.995 5

表 2 算例系统 1 直流子系统计算结果

Table 2 Calculation results of the example system 1 DC subsystem

换流器	方法	$U_d/$	$I_d/$	$\delta/$	M	$P_s/$	$Q_s/$
		p.u	p.u	(°)		p.u	p.u
VSC ₁	统一迭代法	2.000 0	0.618 7	10.715 9	0.807 4	1.249 0	0.209 9
	本文方法	2.000 0	0.614 5	10.555 4	0.807 5	1.249 0	0.209 9
VSC ₂	统一迭代法	1.992 0	0.181 1	-3.035 2	0.829 1	-0.360 1	0.018 7
	本文方法	2.000 7	-0.180 0	-3.034 9	0.825 5	-0.360 1	0.018 7
VSC ₃	统一迭代法	1.989 4	-0.437 5	-6.812 6	0.867 5	-0.866 3	-0.086 4
	本文方法	1.994 0	-0.434 5	-6.812 8	0.865 7	-0.866 3	-0.086 4

表 3 两种方法比较

Table 3 Comparison of two methods

	统一法	本文方法
迭代次数	6	7
计算时间	475 ms	192 ms

算例系统 2 是国际大电网 CIGRE B4-39 工作组于 2005 年提出的用于研究电力电子装置在并网风电场系统中作用的标准系统，其系统结构如图 5 所示^[20]。

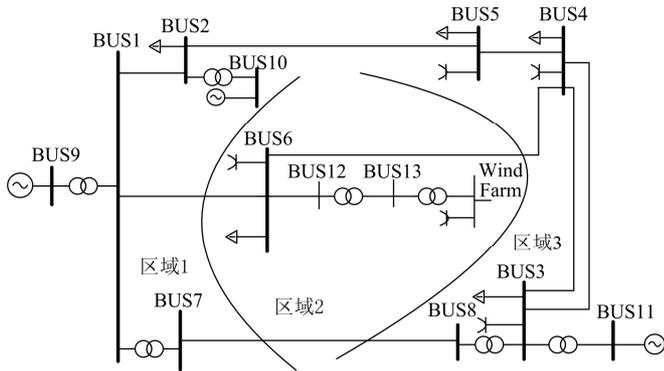


图 5 CIGRE B4-39 标准风电场并网模型

Fig. 5 CIGRE B4-39 standard model of grid connected wind farm

该系统包含了 12 条母线，9 节点为平衡节点，在 12 号节点处通过双端 VSC-HVDC 直流输电系统联接风电场。VSC 参数为： $X_L=0.15$ 、 $R=0.006$ 、直流电阻 $R_d=0.03$ 、 $X_f=400$ 。逆变侧 VSC₁ 采用定直流电压 ($U_{d1}^{sp}=2.0$)、定交流无功功率 ($Q_{s1}^{sp}=-0.08039$) 控制；整流侧 VSC₂ 采用定直流有功功率 ($P_{d2}^{sp}=1.2$)、定交流电压 ($U_s=1.02$) 控制。风电场输出有功功率设为 0.9 p.u，电压为 1.5 p.u。直流子系统、交流子系统潮流计算结果及其迭代次数、计算时间如表 4、表 5、表 6 所示。

从表 6 可知，本文算法快速、有效、迭代步数少。仿真计算结果充分说明了本文所提出的 AC/VSC-HVDC 混联系统潮流快速解耦算法可以应用在风电场直流并网系统的潮流计算中，可以满足电力系统分析的需要，具有较强的实际应用价值。

表 4 算例系统 2 直流子系统计算结果

Table 4 Calculation results of the example system 2 DC subsystem

换流器	U_d	I_d	$\delta(^{\circ})$	M	P_s	Q_s
VSC ₁	2.000 0	-0.594 7	-13.541 9	0.731 7	1.189 4	-0.086 4
VSC ₂	2.017 8	0.594 7	8.034 9	0.854 2	1.2	-0.171 1

表 5 算例系统 2 交流子系统计算结果

Table 5 Calculation results of the example system 2 AC subsystem

节点号	电压	相角/($^{\circ}$)
1	1.052 608	-0.216 486
2	1.017 862	-11.847 052
3	0.994 274	-18.777 874
4	0.956 398	-42.778 603
5	0.829 734	-36.116 730
6	0.847 658	1.896 736
7	1.055 599	-0.310 694
8	0.997 337	-18.675 714
9	1.05	11.747 716
10	1.02	11.747 716
11	1.05	0.0

表 6 迭代次数统计和算法耗时

Table 6 Iteration number statistics and the algorithm time-consuming

直流部分状态量 迭代次数	交流部分迭代次数	VSC 控制量 迭代次数
3	4	3
总计算时间		192 ms

4 结语

(1) 本文针对传统的统一迭代法和交替迭代法在求解风电场经 VSC-HVDC 并网的系统潮流时，不可避免会出现雅可比矩阵为零、迭代无法进行这一缺陷，提出了一种风电场并网系统潮流的交直流解耦算法，它克服了传统算法的各种缺陷。

(2) 本文算法模型简单、可完全继承现有交流程序、编程工作量小。

(3) 交流系统和直流系统计算中不再相互影响，且不增加扩展变量，因而算法速度快。

参考文献

- [1] 李俊峰. 风光无限-中国风电发展报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
LI Jun-feng. China wind power outlook[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [2] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi, SUN Jian-feng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [3] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.
GE Jiang-bei, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 146-153.

- [4] 李滨, 杜培, 韦化. 含同步风电机组的电力系统动态最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 8-15. LI Bin, DU Pei, WEI Hua. Dynamic optimal power flow considering synchronous wind generator system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 8-15.
- [5] 夏澍, 周明, 李庚银. 含大规模风电场的电力系统动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 71-77. XIA Shu, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Dynamic economic dispatch of power system containing large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 71-77.
- [6] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51. TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.
- [7] 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, 2010.
- [8] SCHETTLER F, HUANG H, CHRISTL N. HVDC transmission systems using voltage sourced converters design and applications[C] // IEEE PES Summer Meeting, Alberta, Canada: IEEE, 2000, 2: 715-720.
- [9] 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.
- [10] LI Geng-yin, ZHOU Ming, HE Jie, et al. Power flow calculation of power systems incorporating VSC-HVDC[C] // International Conference on Power System Technology, Singapore: IEEE, 2004, 2: 1562-1566.
- [11] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14. TANG Guang-fu, HE Zhi-yuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [12] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(19): 61-63. YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie. Multi-terminal HVDC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-63.
- [13] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5. ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei, et al. Study on the steady characteristics and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [14] 郑超, 盛灿辉. 含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 65-69. ZHENG Chao, SHENG Can-hui. Uniform iterative power flow algorithm for systems equipped with VSC-HVDCs[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 65-69.
- [15] 郑超. 实用柔性直流输电系统建模与仿真算法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1058-1063. ZHENG Chao. Study on practical modeling and simulation algorithm for VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1058-1063.
- [16] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 刘洋, 康凯, 王邦惠, 等. 含风电系统的潮流计算分析[J]. 山东电力技术, 2009(4): 21-23. LIU Yang, KANG Kai, WANG Bang-hui, et al. Power flow calculation and analysis on power system including wind farms[J]. Shandong Electric Power, 2009(4): 21-23.
- [18] 徐娇, 李兴源. 异步风力发电机组的简化 RX 模型及其潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 22-23. XU Jiao, LI Xing-yuan. A simplified RX model of asynchronous wind generators and load flow analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 22-23.
- [19] 叶芳, 卫志农, 孙国强. 含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的改进潮流算法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 338-343. YE Fang, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang. Modified power flow algorithm for hybrid AC-DC systems equipped with VSC-MTDC[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(3): 338-343.
- [20] 钱少锋, 林俐, 沈辉, 等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 12-13. QIAN Shao-feng, LIN Li, SHEN Hui, et al. Dynamic characteristic analysis of transmission grid including large wind farm by PSS/E wind package[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 12-13.

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-06-13

作者简介:

牛博彦(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制、直流输电;

胡林献(1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制、直流输电; E-mail: linxian_hu@163.com

张众(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制、直流输电。