# 含直流电源与负荷的交直流系统潮流算法

傅 裕!杨建华!张 琪2

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083;2. 北京电力公司密云供电公司,北京 101500)

摘要:考虑轻型高压直流输电技术的特点,提出了基于电压源换流器(VSC)的交直流电力系统统一迭代潮流 求解算法,分别从交流网络、电压源换流器和直流网络三部分推导了其相应的牛顿--拉夫逊法潮流计算修正方 程式。该算法可以进行包含直流电源和直流负荷的交直流系统潮流计算。修改的WSCC-9节点系统仿真结 果验证了所提算法的正确性和有效性。

关键词:高压直流输电;交直流;电力系统;潮流计算;可再生能源;发电;电压源换流器

中图分类号: TM 744 文献标识码: A

### 0 引言

轻型高压直流输电技术以电压源换流器 VSC (Voltage Source Converter)为基础,具有有功功率和 无功功率独立控制、可向无源网络供电、换向可靠性 高等优点,在高压直流输电和可再生能源发电系统 中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

可再生能源发电单元一般包括直流网络[4]。 因此,含可再生能源电源的电力系统潮流分析应采 用交直流潮流算法[5]。传统交直流潮流计算方法主 要针对相控换流器<sup>[6-7]</sup>,而 VSC 采用脉冲宽度调制 PWM(Pulse Width Modulation)控制技术,其工作原 理与基于相控换流器的交直流系统存在显著差异. 因此,对于采用 VSC 技术的交直流电力系统,其潮 流分析无法沿用传统的交直流潮流算法。文献[8-10] 对轻型直流输电的交直流潮流计算方法进行了研 究,给出了交替求解潮流算法:文献[11]最早提出了 可嵌入牛顿法潮流计算的 VSC 数学模型,实现了对 含 VSC 的交直流系统的潮流计算: 文献 [12] 推导不 同控制方式下交直流系统的潮流修正方程式,提出 了 VSC 交直流系统潮流的统一迭代求解算法。这些 算法中均没有直接处理可再生能源发电系统中的直 流电源和直流负荷,收敛性也有待进一步改进。

本文在分析轻型直流输电技术特点的基础上, 将 VSC 和直流网络嵌入牛顿-拉夫逊潮流迭代算法 中,从交流网络、VSC 和直流网络三部分推导了其相 应的修正方程式,实现了包含直流电源和直流负荷 的交直流电力系统潮流计算。

## 1 可再生能源发电与直流网络

近年来,太阳能和风力发电等可再生能源发电

Program for the 11th Five-year Plan(2006BAJ04B03)

DOI: 10.3969/j.issn.1006–6047.2013.01.018

技术得到越来越广泛的应用。太阳能发电和蓄电池 均为直流输出,在接入电网运行时需要通过逆变器 转换成交流电。

风力发电机虽然为交流输出,但考虑到风速的随机性特点,目前,许多风电场使用 VSC 技术先将 交流整流,再经逆变后接入大电网中<sup>[13-14]</sup>。

小型可再生能源发电系统,如农村户用风、水、 光互补发电系统<sup>[15]</sup>,需将各发电单元经过转换器和 直流母线汇流,并接入统一的储能单元后再逆变成 交流电,向用户供电或接入电网。此外,直流母线上 有时还直接向直流负载供电。

## 2 基于 VSC 的交直流分界面模型

在基于 VSC 的交直流输电系统中,与 VSC 相连 的交流母线称为交流特殊母线,采用变量 i 编号;其 余交流母线称为交流普通母线,采用变量 j 编号。选 取一个与母线 i 连接的 VSC,编号为 l,其稳态物理 模型如图 1 所示,其中  $P_{sl},Q_{sl}$ 分别为从交流母线流 向 VSC 的有功功率和无功功率; $R_{cl},X_{cl}$ 分别为 VSC 等效电阻和换流电抗; $U_{i},U_{d}$ 分别为交流母线电压和 VSC 输出基频电压; $\delta_{i},\delta_{cl}$ 分别为  $U_{i}$ 和  $U_{d}$ 的相位 角; $P_{i},Q_{i}$ 分别为注入母线 i 的有功功率和无功功 率; $P_{cl},Q_{d}$ 分别为流入 VSC 的有功功率和无功功率;  $U_{d},I_{d}$ 分别为 VSC 的直流侧电压、电流; $M_{l},\delta_{l}$ 为 PWM 控制系统的控制变量。

设 PWM 的直流电压利用率为 $\mu_l(0 < \mu_l \leq 1)$ , 调制度为 $M_l(0 < M_l \leq 1)$ ,则有:



图 1 基于 VSC 的交直流输电模型 Fig.1 Model of AC-DC transmission based on VSC

收稿日期:2012-01-10;修回日期:2012-10-15 基金项目:国家"十一五"科技支撑项目(2006BAJ04B03) Project supported by the National Key Technologies R & D

$$U_{d} = \frac{\mu_{l} M_{l}}{\sqrt{2}} U_{dl} \tag{1}$$

根据图 1 所示的电压关系,可以得到 VSC 从交流母线吸收的有功功率和无功功率.

$$P_{sil} = \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il} U_{dl} Y_{il} \sin(\delta_{il} - \alpha_{il}) + U_{il}^2 Y_{il} \sin\alpha_{il} \qquad (2)$$

$$Q_{sl} = -\frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il} U_{dl} Y_{il} \cos(\delta_{il} - \alpha_{il}) + U_u^2 Y_{il} \cos \alpha_{il} \quad (3)$$

其中, $Y_{il}=1/\sqrt{R_{cil}^2+X_{cil}^2}$ , $\alpha_{il}=\arctan(R_{cil}/X_{cil})$ , $\delta_{il}=\delta_{ti}-\delta_{clo}$ 

# 3 含直流电源和直流负荷的交直流潮流计 算方法

在研究交直流系统的潮流计算方法时,可以将 该系统划分为交流网络、VSC 和直流网络三部分,其 中 VSC 作为交流网络和直流网络之间的中间联络 环节,通过 VSC 的换流器方程形成交、直流网络的 耦合关系。下面分别建立各部分的功率、电流不平衡 方程,从而形成牛顿-拉夫逊法统一迭代的修正方 程组。

a. 交流网络方程。

对于交流普通母线,其功率不平衡方程可直接 采用相应的牛顿-拉夫逊法潮流计算公式<sup>60</sup>。

对于图 1 中的交流特殊母线 *i*,考虑到它与 VSC 存在功率交换关系,可以列出其功率不平衡方程:

$$\Delta P_{ii} = P_{ii} - U_i \sum_{i < i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{sil}$$
(4)

$$\Delta Q_{ii} = Q_{ii} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{sil} \qquad (5)$$

其中, $U_i$ 和 $U_j$ 分别为交流母线i,j的电压; $G_{ij},B_{ij}$ 和  $\theta_{ij}$ 分别为母线i与j之间的电导、电纳和电压相位差。

**b.** VSC 方程。

由式(2)、(3)可得 VSC 的功率不平衡方程:

$$\Delta P_{sil} = P_{sil} - \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il} U_{dl} Y_{il} \sin(\delta_{il} - \alpha_{il}) - U_{il}^2 Y_{il} \sin\alpha_{il} \quad (6)$$

$$\Delta Q_{sil} = Q_{sil} + \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il} U_{dl} Y_{il} \cos(\delta_{il} - \alpha_{il}) - U_{il}^2 Y_{il} \cos\alpha_{il} (7)$$

因换流桥的损耗已由电阻 R<sub>eil</sub>等效,故直流功率 P<sub>d</sub> 与注入换流桥的有功功率 P<sub>d</sub> 相等,有:

$$P_{dl} = U_{dl} I_{dl} \tag{8}$$

因此,换流桥的功率不平衡方程为:

$$\Delta P_{cl} = U_{dl}I_{dl} - \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il}U_{dl}Y_{il}\sin(\delta_{il} + \alpha_{il}) + \frac{1}{2} (\mu_l M_l U_{dl})^2 Y_{il}\sin\alpha_{il}$$
(9)

VSC 的直流侧与直流网络只有一对交互变量, 即直流电压与直流电流,如图 2 所示。因此,VSC 输 出电流与直流网络有如下不平衡方程:

$$\Delta d_l = I_{dl} - \frac{U_{dl} - U_{dn}}{R_{dl}} \tag{10}$$

其中, $R_u$ 为 VSC 连接直流支路的电阻; $U_u$ 为该支路 连接的直流节点电压;n为直流母线编号。

$$\begin{array}{c|c} U_{u} & I_{u} \\ \hline VSC & R_{u} \\ \hline R_{u} \\ \end{array} \begin{array}{c} U_{u} & I_{u} \\ \hline U_{u} & \tilde{m} \\ \hline m \\ P_{du} \\ \end{array}$$

图 2 直流网络与换流器的连接结构图

Fig.2 Connection between DC grid and converter **c.** 直流网络方程。

对于直流网络中的直流节点,有:

$$\Delta P_{\rm dn} = P_{\rm dn} - U_{\rm dn} \sum I_{\rm d} \tag{11}$$

其中,P<sub>da</sub>为节点注入功率;∑I<sub>d</sub>为该节点所有支路及 直流电源和直流负荷电流之和,流出方向为正;VSC 输出端看成一条直流母线参与编号和计算。

对各支路有直流电流不平衡方程:

$$\Delta d_n = I_{dn} - \frac{U_{dn1} - U_{dn2}}{R_{dn}}$$
(12)

其中,U<sub>du1</sub>、U<sub>du2</sub>为该支路首、末端节点电压。

将各部分的功率及电流不平衡方程组合成基于 VSC的交直流系统潮流计算修正方程式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{a} \\ \Delta P_{t} \\ \Delta Q_{a} \\ \Delta Q_{t} \\ \hline \Delta D_{c} \\ \hline \Delta D_{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{at} & N_{aa} & N_{at} \\ H_{ta} & H_{tt} & N_{ta} & N_{tt} \\ J_{aa} & J_{at} & L_{aa} & L_{at} \\ \hline J_{ta} & J_{tt} & L_{ta} & L_{tt} \\ \hline 0 & 0 & C_{ca} & C_{ct} & F_{cc} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & F_{dc} & F_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{a} \\ \Delta \delta_{t} \\ \Delta U_{a} / U_{a} \\ \hline \Delta U_{t} / U_{t} \\ \hline \Delta X_{c} \\ \hline \Delta X_{d} \end{bmatrix}$$
(13)

$$\boldsymbol{A}_{tc} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{P}_{t}}{\partial \boldsymbol{X}_{c}}, \boldsymbol{B}_{tc} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{Q}_{t}}{\partial \boldsymbol{X}_{c}}, \boldsymbol{C}_{ca} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{c}}{\partial \boldsymbol{U}_{a}}, \boldsymbol{C}_{cd} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{c}}{\partial \boldsymbol{U}_{d}}$$
$$\boldsymbol{F}_{cc} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{c}}{\partial \boldsymbol{X}_{c}}, \boldsymbol{F}_{cd} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{c}}{\partial \boldsymbol{X}_{d}}, \boldsymbol{F}_{dc} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{d}}{\partial \boldsymbol{X}_{c}}, \boldsymbol{F}_{dd} = \frac{\partial \Delta \boldsymbol{D}_{d}}{\partial \boldsymbol{X}_{d}}$$

其中, $\Delta P_{a}$ 、 $\Delta Q_{a}$ 、 $\Delta P_{t}$ 、 $\Delta Q_{t}$ 分别为交流系统普通母线 和特殊母线的有功、无功不平衡量; $\Delta \delta_{a}$ 、 $\Delta \delta_{t}$ 、 $\Delta U_{a}$ 、  $\Delta U_{t}$ 分别为交流电压相位角和幅值修正量; $\Delta D_{c} = [\Delta P_{sl}, \Delta Q_{sl}, \Delta P_{cl}, \Delta d_{l}]^{T}, \Delta D_{d} = [\Delta P_{dn}, \Delta d_{n}]^{T}, \Delta X_{c} = [\Delta U_{dt}, \Delta I_{dt}, \Delta \delta_{t}, \Delta M_{t}]^{T}, \Delta X_{d} = [\Delta U_{dt}, \Delta I_{dt}]^{T}$ 。矩阵中以实线为 界, 左上角部分为交流网络的雅可比矩阵。

式(13)仅是含直流电源和直流负荷的交直流潮 流计算时修正方程组的总体结构形式,而实际计算 时需要根据 VSC 的不同控制方式<sup>[10,12]</sup>灵活地加以变 化。基于 VSC 的交直流系统中 VSC 可以选择的控制 方式有以下 4 种:定有功功率  $P_d$  及定无功功率  $Q_d$ 控制;定有功功率  $P_d$  及定交流母线电压  $U_t$ 控制;定 直流电压  $U_d$  及定无功功率  $Q_d$ 控制;定直流电压  $U_d$ 及定交流母线电压  $U_t$ 控制。例如,对应定直流电压 控制的 VSC,则修正方程组中不需包括  $\Delta P_{sl}$ 和  $\Delta U_{al}$ 项;对应定交流母线电压控制时,则无  $\Delta U_t$ 的修正 方程。

第1期

另外还需注意,在 $\Delta D_{d_x} \Delta X_{d}$ 中必须忽略与 $\Delta D_{e_x} \Delta X_{e_x}$ 中重复的直流电流不平衡方程。

### 4 算例与分析

如图 3 所示,对 WSCC-9 节点系统<sup>[16]</sup>配以 VSC、 直流电源和直流负荷,其中 VSC<sub>1</sub>和 VSC<sub>2</sub>分别连接 于交流母线 7 和母线 5 上, VSC<sub>1</sub> 采用定直流电压 ( $U_{21}^{eff}$ =1.8 p.u.)、定无功功率( $Q_{22}^{eff}$ =0.1 p.u.)控制;VSC<sub>2</sub> 采用定有功功率( $P_{22}^{eff}$ =-0.8 p.u.)、定交流母线电压 ( $U_{22}^{eff}$ =1.02 p.u.)控制。VSC 部分的主要电路参数为  $R_{c71}$ = $R_{c52}$ =0.005 p.u., $X_{c71}$ = $X_{c52}$ =0.12 p.u.; 直流网络 的电阻  $R_{11}$ = $R_{13}$ =0.02 p.u., $R_{12}$ =0.03 p.u.。光伏电池 按  $P_{\mu\nu}$ =0.4 p.u. 定功率输出,直流负荷  $P_{de}$ =0.2 p.u.。 设直流电压利用率为 1。



图 3 修改的 WSCC-9 节点交直流系统 Fig.3 Modified WSCC 9-bus AC/DC hybrid power system

潮流计算结果如表 1—5 所示,表中  $U_{d}$ 、 $I_{d}$ 、 $\delta$ 、M、  $P_{s}$ 、 $Q_{s}$ 、 $U_{s}$ 分别为 VSC 直流侧电压、VSC 的直流侧电 流、PWM 调制波相角、PWM 调制度、交流母线流向 VSC 的有功功率、交流母线流向 VSC 的无功功率、 交流母线电压,所有电压、电流、功率均为标幺值。 从表 1 中可见,该潮流算法可收敛于各 VSC 的控制 目标。为验证计算结果的正确性,还使用了交替迭

表 1 VSC 部分交直流潮流计算结果

Tab.1 Results of AC/DC power flow calculation for VSC

换流器	$U_{ m d}$	$I_{ m d}$	$\delta/(^{\circ})$	M	$P_{\rm s}$	$Q_{s}$	$U_{\rm s}$		
$VSC_1$	VSC <sub>1</sub> 1.8000 0.3397 4.1010 0.7895 0.6133 0.1000 1.017								
$\mathrm{VSC}_2$	VSC <sub>2</sub> 1.7842 0.4504 - 4.9851 0.8443 - 0.8000 - 0.3168 1.020								
表 2 直流网络计算结果									

Tab.2 Results of AC/DC power flow calculation for DC grid

支路	首端 电压	末端 电压	电流	首端输入 功率	末端输出 功率
L1(7-10)	1.800 0	1.793 2	0.339 7	0.6114	0.609 1
L2(11-10)	1.799 9	1.793 2	0.222 2	0.400 0	0.398 5
L3(10-5)	1.793 2	1.784 2	0.450 4	0.807 6	0.803 6

	表 3	交流	支路	计算	结果	
Tab.3	Resu	lts o	f AC/	DC/	power	flow

线路         首端输入功率         末端输出功率           1-4         0.5221+j0.1392         0.5221+j0.1236           2-7         1.6300+j0.2092         1.6300+j0.0485           3-9         0.8500-j0.0787         0.8500-j0.1193           4-5         0.4520+j0.1089         0.4500+j0.0916           4-6         0.0700+j0.1929         0.0694+j0.1893           6-9         -0.8306+j0.1547         -0.8577+j0.0368           7-8         1.0167+j0.0256         1.0082-j0.0464		calculation for AC	2 branch
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	线路	首端输入功率	末端输出功率
$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	1-4	0.5221+j0.1392	0.5221+j0.1236
$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	2-7	1.6300+j0.2092	1.6300+j0.0485
4-5         0.4520+j0.1089         0.4500+j0.0916           4-6         0.0700+j0.1929         0.0694+j0.1893           6-9         -0.8306+j0.1547         -0.8577+j0.0368           7-8         1.0167+j0.0256         1.0082-j0.0464	3-9	0.8500-j0.0787	0.8500-j0.1193
4-6 0.0700+j0.1929 0.0694+j0.1893 6-9 -0.8306+j0.1547 -0.8577+j0.0368 7-8 1.0167+j0.0256 1.0082-j0.0464	4-5	0.4520+j0.1089	0.4500+j0.0916
6-9 -0.8306+j0.1547 -0.8577+j0.0368 7-8 1.0167+j0.0256 1.0082-j0.0464	4-6	0.0700+j0.1929	0.0694+j0.1893
7-8 1.0167+i0.0256 1.0082-i0.0464	6–9	-0.8306+j0.1547	-0.8577+j0.0368
	7-8	1.0167+j0.0256	1.0082-j0.0464
8-9 0.0082-j0.2140 0.0077-j0.2186	8-9	0.0082-j0.2140	0.0077-j0.2186

表 4 发电机出力

Tab.4 Calculative results of generation output

发电机	输出功率
G1	0.522 1+j0.1392
$G_2$	1.6300+j0.2092
C	0.8500 - 0.0787

表 5 交流节点计算结果

Tab.5	Calculative	results	of	AC	node	voltage
-------	-------------	---------	----	----	------	---------

		0
节点	电压幅值	相位角/(°)
1	1.040 0	0
2	1.025 0	16.190 0
3	1.025 0	9.020 0
4	1.032 7	-1.600 0
5	1.020 0	-3.635 6
6	1.014 4	-1.780 0
7	1.017 1	10.580 0
8	1.009 4	6.510 0
9	1.030 6	6.320 0

代法进行求解,得到了接近的计算结果。本实例中 VSC<sub>1</sub>从交流电网吸收有功功率和无功功率;VSC<sub>2</sub>向 交流电网注入有功功率,由于 VSC<sub>2</sub>中输出电压高 于相应的交流母线电压,使得 VSC<sub>2</sub>能向交流电网 提供无功功率。

# 5 结论

可再生能源发电单元的特殊性及轻型交直流输 电的优越性,使得直流网络越来越多地融入现代电 力系统,成为潮流计算中必须考虑的一部分。本文将 VSC 和直流网络的相关数学模型嵌入牛顿-拉夫逊 潮流迭代算法中,提出了含直流电源和直流负荷的 交直流系统潮流的统一迭代求解算法。潮流计算迭 代收敛后,可求得交流母线的电压与相位、VSC 的 控制变量、直流节点电压和支路电流。以修改的 WSCC-9节点交直流系统为例验证了本文潮流迭代 算法的正确性和有效性。

#### 参考文献:

- WEIMERS L. HVDC light: a new technology for a better environment[J]. IEEE Power Eng Review, 1998, 18(8):19-20.
- [2] ASPLUND G. Application of HVDC light to power system

enhancement [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 8(2): 2498-2503.

- [3] STRETCH N,KAZERANL M,EL S R. A current-sourced converterbased HVDC light transmission system [C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics,2006. Quebec,Canada: [s.n.],2006:2001-2006.
- [4] PASKA J,BICZEL P,KLOS M. Hybrid power systems-an effective way of utilising primary energy sources [J]. Renewable Energy, 2009,34(3):2414-2421.
- [5] 王建勋,吕群芳,刘会金,等. 含分布式电源的配电网潮流快速直接算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):17-21.
  WANG Jianxun,LÜ Qunfang,LIU Huijin,et al. Fast and direct power flow algorithm for distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31 (2):17-21.
- [6] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [7] EL-HAWARY M E,IBRAHIM S T. A new approach to AC-DC load flow analysis[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 33 (3):193-200.
- [8] ANGELES-CAMACHO C,TORTELLI O L,ACHA E,et al. Inclusion of a high voltage DC-voltage source converter model in a Newton-Raphson power flow algorithm [J]. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6):691-696.
- [9] 陈谦,唐国庆,王浔. 多端 VSC-HVDC 系统交直流潮流计算[J]. 电力自动化设备,2005,25(6):1-6.

CHEN Qian, TANG Guoqing, WANG Xun. AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6):1-6.

 [10] 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 Xiaoxin,LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC- HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6):1-5.

- [11] LI Gengyin,ZHOU Ming,HE Jie,et al. Power flow calculation of power systems incorporating VSC-HVDC[C]//2004 International Conference on Power System Technology,2004. PowerCon 2004. Singapore:[s.n.],2004;1562-1564.
- [12] 郑超,盛灿辉.含VSC-HVDC的交直流混合潮流统一迭代求解 算法[J].中国电力,2007,40(7):65-69.
  ZHENG Chao,SHENG Canhui. Uniform iterative power flow algorithm for systems equipped with VSC-HVDCs [J]. Electric Power,2007,40(7):65-69.
- [13] 吴俊宏,艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术,2009,33(4):22-27.
  WU Junhong,AI Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms [J]. Power System Technology,2009,33 (4):22-27.
- [14] CHOWDHURY B H, CHELLAPILLA S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation [J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(6):786-800.
- [15] FU Yu, YANG Jianhua, ZUO Tingting. Optimal sizing design for hybrid renewable energy systems in rural areas [J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, 2011, 345 (2): 131-138.
- [16] ANDERSON P M, FOUAND A A. Power system control and stability[M]. 2nd ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

作者简介:

傳 裕(1986-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究 方向为可再生能源发电技术:

杨建华(1963-),男,河南卫辉人,教授,主要研究方向为 电网规划与仿真、可再生能源发电技术、智能电网(E-mail: yang.haag@163.com);

张 琪(1974-), 男, 黑龙江黑河人, 高级工程师, 主要研 究方向为配电网运行与自动化。

### Power flow algorithm for AC/DC system with DC sources and loads

FU Yu<sup>1</sup>, YANG Jianhua<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University,

Beijing 100083, China; 2. Miyun Power Supply Company of

Beijing Electric Power Company, Beijing 101500, China)

**Abstract**: A uniform iterative algorithm of power flow calculation for AC/DC system based on VSC (Voltage Source Converter) is proposed with the consideration of light HVDC technology. The correction equations of the Newton-Raphson method are deduced for AC grid, VSC and DC grid respectively. It can be used for the power flow calculation of AC/DC system with DC sources and loads. Simulative results for the modified WSCC 9-bus AC/DC hybrid power system demonstrate its correctness and validity.

**Key words**: HVDC power transmission; AC/DC; electric power systems; power flow calculation; renewable energy resources; electric power generation; voltage source converter