Electric Power Automation Equipment

含直流电源与负荷的交直流系统潮流算法

裕1.杨建华1.张

(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

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.018

引言

93

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[1-3]。

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[6-7],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。

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

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

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[13-14]。

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[15],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。

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;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_{sil}、Q_{sil} 分别为从交流母线流 向 VSC 的有功功率和无功功率; R_{cil} 、 X_{cil} 分别为 VSC 等效电阻和换流电抗; U_{ii} 、 U_{ci} 分别为交流母线电压和 VSC 输出基频电压; δ_{ι_i} 、 δ_{ι_l} 分别为 U_{ι_l} 和 U_{ι_l} 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_a, Q_a 分别为流入 VSC 的有功功率和无功功率; U_{al} , I_{al} 分别为 VSC 的直流侧电压、电流: M_{l} , δ_{l} 为 PWM 控制系统的控制变量。

设 PWM 的直流电压利用率为 $\mu_l(0 < \mu_l \le 1)$,调 制度为 $M_i(0 < M_i \le 1)$,则有:

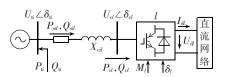


图 1 基于 VSC 的交直流输电模型 Fig.1 Model of AC-DC transmission based on VSC



$$U_{cl} = \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{dl} \tag{1}$$

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:

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

$$Q_{sl} = -\frac{\mu_{l} M_{l}}{\sqrt{2}} U_{il} U_{dl} Y_{il} \cos(\delta_{il} - \alpha_{il}) + U_{il}^{2} Y_{il} \cos \alpha_{il}$$
 (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^[6]。

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:

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

$$\Delta Q_{i} = Q_{ii} - U_{i} \sum_{j \in i} U_{j} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{sil}$$
 (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 θ_{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:

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

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

因换流桥的损耗已由电阻 R_{cil} 等效,故直流功率 P_{il} 与注入换流桥的有功功率 P_{cl} 相等,有:

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

因此,换流桥的功率不平衡方程为:

$$\Delta P_{cl} = U_{cl}I_{dl} - \frac{\mu_l M_l}{\sqrt{2}} U_{il}U_{cll}Y_{il}\sin(\delta_{il} + \alpha_{il}) + \frac{1}{2} (\mu_l M_l U_{dl})^2 Y_{il}\sin\alpha_{il}$$
(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_{dn} 为该支路连接的直流节点电压;n 为直流母线编号。

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_{da} 为节点注入功率; $\sum I_{a}$ 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_{dn1}、U_{dn2}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:

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

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

其中, ΔP_a 、 ΔQ_a 、 ΔP_t 、 ΔQ_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; $\Delta \delta_a$ 、 $\Delta \delta_t$ 、 ΔU_a 、 ΔU_t 分别为交流电压相位角和幅值修正量; ΔD_c = $[\Delta P_{sil}, \Delta Q_{sil}, \Delta P_{cl}, \Delta d_l]^T$, ΔD_d = $[\Delta P_{du}, \Delta d_n]^T$, ΔX_c = $[\Delta U_{du}, \Delta I_{du}, \Delta \delta_t, \Delta M_t]^T$, ΔX_d = $[\Delta U_{du}, \Delta I_{du}]^T$ 。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[10,12]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 ΔP_{st} 和 ΔU_d 项;对应定交流母线电压控制时,则无 ΔU_t 的修正方程。

另外还需注意,在 ΔD_{d} 、 ΔX_{d} 中必须忽略与 ΔD_{e} 、 ΔX_{e} 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^[16]配以 VSC、直流电源和直流负荷,其中 VSC₁ 和 VSC₂ 分别连接于交流母线 7 和母线 5 上,VSC₁ 采用定直流电压 (U_{cl}^{Mf} =1.8 p.u.)、定无功功率(Q_{cl}^{Mf} =0.1 p.u.)控制;VSC₂ 采用定有功功率(P_{cl}^{Mf} =-0.8 p.u.)、定交流母线电压 (U_{cl}^{Mf} =1.02 p.u.)控制。VSC 部分的主要电路参数为 R_{cl} = R_{cs} =0.005 p.u., X_{cl} = X_{cs} =0.12 p.u.;直流网络的电阻 R_{Ll} = R_{L3} =0.02 p.u., R_{L2} =0.03 p.u.。光伏电池按 P_{pv} =0.4 p.u. 定功率输出,直流负荷 P_{dc} =0.2 p.u.。设直流电压利用率为 1。

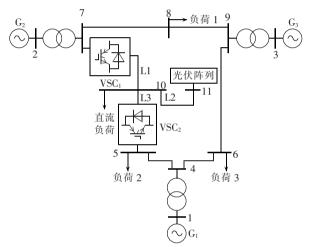


图 3 修改的 WSCC-9 节点交直流系统 Fig.3 Modified WSCC 9-bus AC/DC hybrid power system

潮流计算结果如表 1—5 所示,表中 $U_{\rm d}$ 、 $I_{\rm d}$ 、 δ 、M、 $P_{\rm s}$ 、 $Q_{\rm s}$ 、 $U_{\rm s}$ 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	$P_{ m s}$	$Q_{\rm s}$	$U_{ m s}$
VSC_1	1.8000	0.3397	4.1010	0.7895	0.6133	0.1000	1.0171
VSC_2	1.7842	0.4504	- 4.9851	0.8443	-0.8000	- 0.3168	1.0200

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	0.4000	0.398 5
L3(10-5)	1.793 2	1.784 2	0.4504	0.807 6	0.803 6

表 3 交流支路计算结果

Tab.3 Results of AC/DC power flow calculation for AC branch

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
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
G_1	0.522 1+j0.139 2
G_2	1.6300+j0.2092
G_3	0.8500 - j0.0787

表 5 交流节点计算结果

Tab.5 Calculative results of AC node voltage

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	-1.7800
7	1.017 1	10.580 0
8	1.009 4	6.5100
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VSC₁从交流电网吸收有功功率和无功功率;VSC₂向交流电网注入有功功率,由于VSC₂中输出电压高于相应的交流母线电压,使得VSC₂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:

- [1] 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 converter-based 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
- [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.

Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6.

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.l.]; 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 Yu¹, YANG Jianhua¹, ZHANG Oi²

(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