

# 基于改进牛顿法的 VSC-HVDC 潮流计算

黄曙<sup>1</sup>, 何桦<sup>2</sup>, 卫志农<sup>3</sup>, 季聪<sup>3</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东广州 510080; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102;

3. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏南京 210098)

**摘要:** 根据电压源换流器(VSC)新型高压直流输电(HVDC)的稳态特性和控制方式, 建立了含 VSC-HVDC 稳态潮流计算数学模型, 分别采用牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法进行潮流求解, 仿真验证了各算法在 VSC-HVDC 不同控制方式下的有效性, 并对各种算法的计算速度作了比较, 并在此基础上提出了 2 种混合算法, 仿真验证了其优越性。

**关键词:** 电压源换流器; 高压直流输电; 改进牛顿法; 交直流系统; 潮流计算

**中图分类号:** TM744

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2013)01-0018-05

随着电网建设的发展, 直流输电在电网中越来越广泛, 将出现越来越多的交直流混合系统。以全控型开关器件和电压源换流器(VSC)为基础的新一代高压直流(HVDC)输电, 相比基于晶闸管的直流输电, 具有直接向孤立的远距离负荷供电、更经济地向负荷中心送电、运行控制方式灵活多变等优点。因此 VSC-HVDC 的研究成为近年来众多学者研究的热点<sup>[1-6]</sup>。目前采用的交直流混合系统的潮流计算<sup>[7-10]</sup>方法大部分是在交流潮流计算方法的基础上扩展形成的, 主要分为统一迭代求解法和交替迭代求解法两类。统一法是以极坐标形式下的牛顿拉夫逊法(下简称牛顿法)为基础, 将交流节点变量和直流节点变量进行统一迭代求解。交替法是在迭代计算过程中对交直流系统方程分别进行处理, 实现了交流潮流解和直流潮流解的分开迭代, 但由于迭代过程中没有考虑交直流之间的耦合, 因此收敛性不佳, 精度低。

随着电力系统规模的日益扩大以及安全分析等在线计算问题的提出, 潮流计算速度成为一个迫切需要解决的问题。国内外的学者对此进行了广泛的研究, 并提出了许多有益的改进。文中基于 VSC-HVDC 的稳态模型, 导出含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流计算的数学模型, 在此基础上针对牛顿法进行一些改进, 同时通过数学方法证明这些算法的有效性, 并通过多个算例仿真验证这些改进算法在计算时间和收敛性上的优势。

## 1 VSC-HVDC 潮流计算的数学模型

### 1.1 VSC-HVDC 稳态特性

交直流系统由交流系统和直流系统组成, 如图 1 所示。图中  $i$  表示接入直流网络的第  $i$  个 VSC, 假设其输出的基波电压相量为  $\dot{U}_{ci} = U_{ci} \angle \theta_{ci}$ , 与之相连的交流

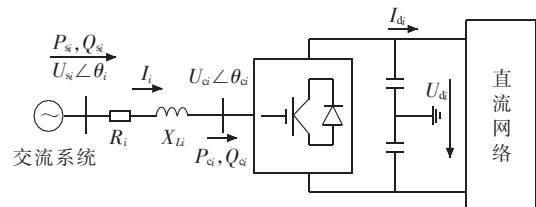


图 1 VSC-HVDC 稳态模型

节点电压相量为  $\dot{U}_{si} = U_{si} \angle \theta_{si}$ ; 换流变压器阻抗为  $jX_{Li}$ ;  $R_i$  为第  $i$  个换流器内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻;  $P_{si}$  和  $Q_{si}$  分别为交流系统流入换流变压器的有功、无功功率;  $P_{ci}$  和  $Q_{ci}$  分别为流入换流桥的有功、无功功率;  $I_i$  为流过换流变压器的电流。则:

$$\dot{I}_i = (\dot{U}_{si} - \dot{U}_{ci}) / (R_i + jX_{Li}) \quad (1)$$

由交流系统流入换流变压器的复功率  $\dot{S}_{si}$  满足如下关系式:

$$\dot{S}_{si} = P_{si} + jQ_{si} = \dot{U}_{si} (\dot{I}_i)^* \quad (2)$$

$$\text{令 } \delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}, |Y_i| = 1 / \sqrt{R_i^2 + X_{Li}^2}, \alpha_i = \arctan(X_{Li} / R_i),$$

将式(1)代入式(2), 进一步推导可得:

$$P_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i| U_{si}^2 \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$Q_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i| U_{si}^2 \sin \alpha_i \quad (4)$$

同理可得:

$$P_{ci} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) + |Y_i| U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$Q_{ci} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i| U_{ci}^2 \sin \alpha_i \quad (6)$$

VSC 换流桥臂的损耗已由  $R_i$  等效, 所以直流功率  $P_{dk}$  应与流入换流桥的功率  $P_{ci}$  相等, 因此可得:

$$P_{dk} = U_{dk} I_{dk} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i| U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (7)$$

式中:  $U_{dk}$ ,  $I_{dk}$  分别为直流节点的电压和电流。另外, 电压方程为:

$$U_{ci} = \frac{\sqrt{6}}{4} M_i U_{di} \quad (8)$$

式中:  $M_i$  为第  $i$  个 VSC 的调制度。

式(1)至(8)则构成了标幺制下 VSC-HVDC 的稳态潮流计算模型<sup>[11]</sup>。

## 1.2 VSC-HVDC 的控制方式

在 VSC-HVDC 中, 直流电压的稳定与否直接关系到系统能否正常运行和交流侧电压的稳定性。若有功发送端的 VSC 从该端交流系统吸收的有功功率大于接受端 VSC 发送到对应端交流系统的有功功率, 直流电压升高, 反之则降低。因此为了实现这种功率上的平衡, 其中一端 VSC 必须采用定直流电压控制。此外, 若直流电压恒定, 则直流电流的变化量正比于有功功率的不平衡量, 定直流电压控制和定有功功率控制是等效的。综合上述分析, VSC 的控制方式可选以下几种<sup>[7]</sup>: ① 定直流电压、定无功功率控制; ② 定直流电压、定交流电压控制; ③ 定有功功率、定无功功率控制; ④ 定有功功率、定交流电压控制。

文中对直流支路两端的 VSC-HVDC 采用以下 4 种控制方式组合: (1) ①+③; (2) ①+④; (3) ③+②; (4) ④+②。

## 1.3 潮流方程

对于系统中的纯交流节点, 其潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ai} = P_{ai}^s - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_{ai} = Q_{ai}^s - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: 下标  $i$  表示第  $i$  个节点; 下标  $a$  表示此节点为纯交流节点;  $U, \theta$  分别为节点电压幅值和相角;  $G, B$  分别为节点导纳矩阵。而对于直流节点, 潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ti} = P_{ti}^s - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} \\ \Delta Q_{ti} = Q_{ti}^s - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 下标  $t$  表示此节点为直流节点;  $P_{si}, Q_{si}$  分别为交流系统流入换流变压器的有功功率和无功功率。

根据上节推导建立的 VSC-HVDC 的稳态模型, 可得到直流系统的潮流计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta d_{i1} = P_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \cos \alpha_i \\ \Delta d_{i2} = Q_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \sin(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \sin \alpha_i \\ \Delta d_{i3} = U_{di} I_{di} - \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i - \alpha_i) + \frac{1}{2} (\mu_i M_i U_{di})^2 |Y_i| \cos \alpha_i \end{cases} \quad (11)$$

对于复杂的多端直流网络, 有:

$$\Delta d_{i4} = I_{di} - \sum_{j=1}^{nc} g_{dij} U_{dj} \quad (12)$$

式中:  $g_{dij}$  为直流网络电导矩阵元素。

## 2 改进牛顿法的数学描述

在数学上, 电力系统潮流计算可以描述为非线性方程组的求解问题。近年来, 非线性代数方程组的求解问题在数学上有了很大的进展。

设变量  $x = [U, \theta, U_d, I_d, \delta, M, P_s, Q_s]^T$ , 而各不平衡量  $f = [\Delta P, \Delta Q, \Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4]^T$ , Jacobian 矩阵用  $J$  表示。

### 2.1 简化牛顿法

简化牛顿法的单变量迭代公式如下:

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_0) \quad (13)$$

该算法计算量小, 但只具备线性收敛性。其多变量矩阵形式如式(14)所示:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - J(x_0)^{-1} f(x^{(k)}) \quad (14)$$

整个计算过程中只需计算一次 Jacobian 矩阵, 计算量大大减少, 但迭代次数会因此有所增加。

### 2.2 三阶收敛牛顿法

文献[12]提出了一种具有三阶收敛性的牛顿法:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k - f(x_k) / f'(x_k)) + f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (15)$$

它是牛顿法与简化牛顿法的结合, 相当于在原有牛顿法每一次的迭代基础上进行一次简化牛顿法迭代:

$$\begin{cases} \tilde{x}_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_k) \\ x_{k+1} = x_k - (f(x_k) + f(\tilde{x}_{k+1})) / f'(x_k) \end{cases} \quad (16)$$

该算法吸取了牛顿法收敛性好和简化牛顿法计算量小的优点, 其多变量矩阵形式如下:

$$\begin{cases} y = x - J(x)^{-1} f(x) \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} - J(x^{(k)})^{-1} (f(x^{(k)}) + f(y^{(k)})) \end{cases} \quad (17)$$

2 次计算中 Jacobian 矩阵不变, 减少了形成 Jacobian 矩阵和进行三角分解的计算量, 节省了一定的计算量。

### 2.3 六阶收敛牛顿法

文献[13]探讨了一种充分利用已计算的  $f(x_k)$  的三阶牛顿法:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{2f(x_k)}{f'(x_k - f(x_k) / f'(x_k)) + f'(x_k)} \quad (18)$$

其迭代过程类似于 2.2 所述三阶收敛牛顿法, 同样分两步进行:

$$\begin{cases} y_k = x_k - f(x_k) / f'(x_k) \\ z_k = x_k - 2f(x_k) / (f'(x_k) + f'(y_k)) \end{cases} \quad (19)$$

其中  $z_k$  即为第  $k$  次迭代后得到的  $x_{k+1}$ 。由于该算法每一步迭代都要重新计算  $f'(x)$ , 计算量和牛顿法相比没有实质性的提高。文献[14]提出在此基础上再增加一次迭代:

$$x_{k+1} = z_k - f(z_k) / f'(z_k) \quad (20)$$

为了减少计算量, 采用一种近似方法计算  $f'(z_k)$  的近似值。根据  $(x_k, f'(x_k))$  和  $(y_k, f'(y_k))$ , 可根据两点法求得  $f'(x)$  的近似表达式:

$$f'(x) \approx \frac{x - x_k}{y_k - x_k} f'(y_k) + \frac{x - y_k}{x_k - y_k} f'(x_k) \quad (21)$$

则可得到  $f'(x)$  在  $z_k$  处的近似值为:

$$f'(z_k) \approx \frac{z_k - x_k}{y_k - x_k} f'(y_k) + \frac{z_k - y_k}{x_k - y_k} f'(x_k) \quad (22)$$

将式(19)代入(22), 可得:

$$f'(z_k) \approx \frac{f'(x_k)(3f'(y_k) - f'(x_k))}{f'(x_k) + f'(y_k)} \quad (23)$$

式(19)、(20)、(23)组成了一种新的六阶收敛方法<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} y_k = x_k - f(x_k) / f'(x_k) \\ z_k = x_k - 2f(x_k) / (f'(x_k) + f'(y_k)) \\ x_{k+1} = z_k - \frac{f(z_k)}{f'(z_k)} \end{cases} \quad (24)$$

其多变量矩阵形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} - 2(\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)}))^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} - \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)})}{3\mathbf{J}(\mathbf{y}^{(k)}) - \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})} \mathbf{f}(\mathbf{z}^{(k)}) \end{cases} \quad (25)$$

该算法只计算 2 次  $f(x)$  和  $J(x)$ , 无需计算海森矩阵, 但具备六阶收敛性, 减少了计算量, 节省了计算时间。

### 3 算例分析

#### 3.1 基本算例测试

下面以经修改的 IEEE-14 节点系统为例, 验证上述算法的有效性。将 IEEE-14 节点系统的 13-14 支路替换为直流支路, 并在交流节点接入 VSC 装置后得到的交直流系统如图 2 所示。直流系统参数如表 1 所示, 均为标幺值。

其中:  $N_{\text{Bus}}$  表示 VSC 所在的交流母线号;  $P_s, Q_s$  分别为直流系统的注入有功、无功功率;  $U_d$  为直流电压;  $R, X_L$  由系统给定。  $P_s, Q_s$  初值设为与修改前系统支路功率相等, 由原系统的潮流计算得到。  $I_d, \delta, M$  由式(26—28)得到。

$$I_{di} = (P_{gi} - P_{li}) / U_{di} \quad (26)$$

$$\delta_i = \arctan(P_{li} / (U_{di}^2 / X_{Li} - Q_{li})) \quad (27)$$

$$M_i = 2\sqrt{6} P_{li} X_{Li} / (3U_{di} U_{di} \sin \delta_i) \quad (28)$$

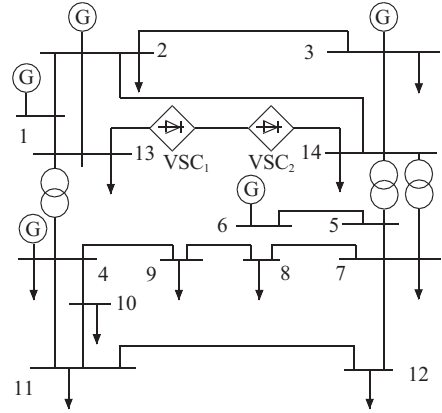


图 2 经修改的 IEEE-14 节点交直流混合系统

表 1 直流系统参数

$N_{\text{Bus}}$	$R$	$X_L$	$P_s$	$Q_s$	$U_d$
13	0.006	0.150	0.919	0.122	2.000
14	1.006	0.150	-0.899	0.173	2.000

式中:  $P_{gi}$  为节点发电有功。

经修改的 IEEE-14 节点系统在牛顿法以及文中所述 2 种改进算法下进行潮流计算, 其迭代次数、计算时间和误差比较如表 2 所示。所有算法均在 Windows 平台下用 matlab 编程实现。为保证计算时间尽可能准确, 采取计算 100 次潮流取平均时间的方法进行仿真。所用电脑主频 1.8 GHz, 内存 2 G。

表 2 迭代次数和计算时间比较

控制方式 ③+②	迭代次数	计算时间 /ms	误差
牛顿法	4	6.50	1.70e-11
简化牛顿法	13	8.18	2.72e-10
三阶牛顿法	2.5*	5.76	4.22e-15
六阶牛顿法	2	7.00	6.22e-15

\* 表示只进行了前半次迭代即达到收敛要求。

可见, 三阶收敛牛顿法在计算时间和收敛精度上, 都有比较明显的优势; 而简化牛顿法虽然无需多次计算 Jacobian 矩阵, 但由于迭代次数远大于其他算法, 时间反而有所增加; 六阶牛顿法迭代次数最少, 但迭代时间略长。

#### 3.2 控制模式测试

在实际电力系统运行中, 为了实现稳定运行、减少损耗、控制潮流等功能, VSC-HVDC 常常需要在多种控制模式下运行。在不同控制方式下, 4 种算法的迭代次数和计算时间上的比较如表 3 所示。A 表示牛顿法, B 为简化牛顿法, C 为三阶收敛牛顿法, D 为六阶收敛牛顿法。

由表 3 可知, 不同控制方式下, 这 4 种方法均能有效解决含 VSC-HVDC 的潮流计算问题, 且 4 种控制

表3 不同控制方式下计算结果比较

①+③	迭代次数	计算时间/ms	①+④	迭代次数	计算时间/ms
A	4	6.52	A	4	6.62
B	13	8.25	B	13	8.11
C	2.5	5.79	C	2.5	5.85
D	2	7.07	D	2	7.06
③+②	迭代次数	计算时间/ms	④+②	迭代次数	计算时间/ms
A	4	6.50	A	4	6.51
B	13	8.18	B	11	7.05
C	2.5	5.76	C	2.5	5.84
D	2	7.00	D	1.5	6.05

方式下,三阶收敛牛顿法在计算时间上一直占有比较明显的优势;而六阶收敛牛顿法迭代次数最少。

### 3.3 算法效率测试

表4列出了牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法对各经修改的IEEE标准系统进行潮流计算时的迭代次数和计算时间,各系统直流支路两端的VSC控制方式组合为③+②。

表4 各算例迭代次数和计算时间比较

算例	迭代次数			
	A	B	C	D
IEEE-30	4	12	2.5	1.5
IEEE-57	4	17	2.5	1.5
IEEE-1184	4	15	2.5	1.5
算例	计算时间/ms			
	A	B	C	D
IEEE-30	14.78	14.80	12.97	13.90
IEEE-57	45.59	47.05	37.16	41.58
IEEE-1184	372.19	203.67	301.04	257.00

结果表明,当系统较小时,高阶收敛牛顿法计算时间较短,原因在于Jacobian矩阵的形成和三角分解计算量不大,简化牛顿法因迭代次数远大于三阶收敛牛顿法而使得其他计算量增加;当系统较大时,Jacobian矩阵的形成和三角分解计算量所占比重较大,简化牛顿法由于Jacobian恒定,减少了大量的计算量,计算时间最短。

表5列出了误差精度从 $10^{-3}$ 到 $10^{-9}$ 时,IEEE-57系统计算时间比较。

表5 精度对计算时间的影响

误差	计算时间/ms			
	A	B	C	D
$10^{-3}$	34.00	26.88	27.68	41.58
$10^{-5}$	34.00	32.46	29.81	41.58
$10^{-7}$	45.59	38.12	37.16	41.58
$10^{-9}$	45.59	47.05	37.16	41.58

简化牛顿法在精度要求比较低的时候速度最快,但随着精度要求的提高,计算时间的增加速度较快;而三阶收敛牛顿法在几种精度要求下,计算速度均比较快;六阶收敛牛顿法一次迭代即可达到比较高的精度( $3.04 \times 10^{-10}$ ),但计算时间的优势相较于三阶收敛牛顿法略有不足。

可见在精度要求较低时,采用低阶牛顿法计算速度比较快;而精度要求较高时,采用高阶牛顿法效果更佳。由此提出混合迭代算法,即在初期先进行一两次高阶牛顿算法的迭代,然后采用简化牛顿法进行后续迭代。为说明问题,将精度定为 $10^{-13}$ ,算例结果如表6所示。AB表示该算法为算法A(牛顿法)和B(简化牛顿法)的混合,CB表示该算法为算法C(三阶收敛牛顿法)和B(简化牛顿法)的混合。

表6 迭代次数和计算时间比较

IEEE-57	A	B	C	D	AB	CB
迭代次数	5	24	3	2	3+3	2+4
计算时间/ms	63.09	74.02	49.55	58.74	49.05	44.56

AB算法的迭代次数为3+3,指的是该算例仿真进行了3次牛顿法迭代和3次简化牛顿法迭代,同理,CB算法进行了2次三阶收敛牛顿法迭代和4次简化牛顿法迭代。算例结果表明,混合算法比前面涉及的4种算法计算速度都要快。原因在于:低阶牛顿法在处理精度要求高的问题时迭代次数增加而导致计算量上升;高阶牛顿法在处理精度要求低的问题时,迭代次数虽少,但单步迭代计算量较大,而且往往结果精度高于要求值,最终计算速度反而比较慢。文中通过高低阶牛顿法的合理搭配,求解时间大大减少。

## 4 结束语

在VSC-HVDC稳态潮流方程的基础上,从以下几个方面对含VSC-HVDC的交直流混合系统的稳态潮流问题进行了研究:将牛顿法、简化牛顿法、三阶收敛牛顿法和六阶收敛牛顿法用于解含VSC-HVDC的交直流潮流计算;通过算例仿真验证了各算法在各控制方式下的有效性;考虑在不同精度下,上述各算法在解含VSC-HVDC的交直流潮流时的计算时间差异和变化趋势;提出2种高低阶混合迭代算法,通过算例仿真验证了它们的有效性,并与前述4种算法进行比较,验证了新算法在计算速度上的优势。

### 参考文献:

- [1] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):77-81.
- [2] 胡弢.VSC-HVDC的谐波分析[J].江苏电机工程,2009,28(4):9-13.

- [3] 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.
- [4] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC Power Transmission Systems; an Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [5] 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.
- [6] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):77-81.
- [7] 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 Algorithm [J]. IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, 2003, 150(6): 691-696.
- [8] PIZANO-MARTINEZ A, FUERTE-ESQUIVEL C R, AMBRIZ-PEREZ H, et al. Modeling of VSC-based HVDC Systems for a Newton-Raphson OPF Algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1794-1803.
- [9] 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.
- [10] ZHANG X P. Multiterminal Voltage-sourced Converter-based HVDC Models for Power Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1877-1884.
- [11] 孙国强,李育燕,卫志农,等.含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计[J].电力系统自动化设备,2010,30(9):6-12.
- [12] NOOR M A, NOOR K I. Three-step Iterative Methods for Nonlinear Equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 183(1): 322-327.
- [13] WEERAKOON S, FERNANDO T C I. A Variant of Newton's Method with Accelerated Third-order Convergence [J]. Applied Mathematics Letters, 2000, 13(8): 87-93.
- [14] PARHI S K, GUPTA D K. A Sixth Order Method for Nonlinear Equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 203(1): 50-55.
- [15] SHARMA J R, GUHA R K. A Family of Modified Ostrowski Methods with Accelerated Sixth Order Convergence [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(1): 111-115.

#### 作者简介:

黄曙(1979),男,广东广州人,工程师,从事电力系统二次专业研究及技术管理工作;

何桦(1977),男,江西南昌人,硕士,从事 EMS 系统应用软件的开发与研究工作;

卫志农(1962),男,江苏江阴人,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等;

季聪(1988),男,江苏如东人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制。

## Power Flow Calculation of VSC-HVDC Based on Improved Newton Method

HUANG Shu<sup>1</sup>, HE Hua<sup>2</sup>, WEI Zhi-nong<sup>3</sup>, JI Cong<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** On basis of the steady characteristics and the control patterns of high voltage direct current (HVDC) transmission system with voltage source converter (VSC), a mathematical model is built for power flow calculation of VSC-HVDC, which use Newton method, simplified Newton method, third-order convergence Newton method and six-order convergence Newton method respectively for power flow calculation. Results from simulation prove that the algorithms are effective for various kinds of control patterns of VSC-HVDC. Calculation speeds of each algorithm are also compared. Based on those simulation results, two hybrid algorithms are proposed and simulated to verify their superiority.

**Key words:** voltage source converter; high voltage direct current transmission; improved Newton's method; ac-dc power system; power flow calculation

## 国外页岩气的开发

页岩气的最早研究开始于美国,可追溯到 1821 年。当时钻探的第一口天然气生产井就是页岩气井,在井深达到 21 m 处,从 8 m 厚的页岩裂缝中就产出了天然气,这时纽约州弗里多尼亚乡村地区已将页岩气用于家庭照明。

一直以来页岩都被认为是一种盖层,因此钻井人员在钻井过程中都是直接穿越页岩层段去开采其他储层。在过去的 100 多年里,所钻的数百万口油气井在达到其目标深度之前,都钻透了大量的页岩层段。直到 20 世纪 20 年代,美国才开始页岩气的现代化工业生产,到 70 年代中期开始步入规模化发展阶段。据美国地质调查局报道,2006 年美国页岩气产量占年天然气总产量的 6%,2007 年占 8%,2010 年这一比例达到 13%。

目前,美国和加拿大等国已实现了页岩气的商业性开发,但是其他国家页岩气的发展并不乐观,主要原因不是缺少页岩气盆地,而是在于页岩气产量低、开发技术难度大等。页岩气采收率比常规天然气低,常规天然气采收率在 60%以上,而页岩气仅为 5%~60%(采收率是指在现代技术和经济条件下可能采到的油气数量与油气藏中原始储量的比值),再加上生产周期和回收成本时间长,导致很多国家的页岩气资源开发缺乏充足的投资。

摘自《国家电力信息网》