

# 交直流混合输电系统的无功优化

彭磊, 吴耀武, 熊信银, 姜素华

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了交直流混合系统的无功优化模型, 优化控制变量不仅包含传统的交流部分的发电机无功输出、补偿电容器容量、变压器分接头, 而且还引入直流部分换流器的控制电压、控制电流、控制功率以及换流变压器变比。模型运用 PSO 算法进行优化求解。引用 IEEE 中 9 节点算例表明该模型是正确的, 该算法是收敛、有效的。

**关键词:** 无功优化; 混合输电系统; 高压直流输电; 粒子群算法

**中图分类号:** TM714.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0035-05

## 0 引言

在现代电网中, 由于电网互联可以提高供电可靠性、节省电力投资、提高电网运行经济效益, 各大电网的联网已是大趋势。各大电网的连接问题上, 有直流连接和交流连接两种, 如东北网和华北网就是交流连接, 华东网与华中网就是以葛洲坝—南桥直流线路实现互联。直流联网具有可以有效防止大规模停电、可以进行事故紧急支援、不影响被联网的稳定水平等优点, 因此直流输电方式已经在大容量网络电能传输中被广泛运用。目前中国已经有 10 个直流输电工程, 总输电容量 > 18 GW, 总输电距离 > 7 000 km, 无论是输电容量和输电距离都已经成为直流输电世界第一大国<sup>[1]</sup>。而在交直流系统中, 直流输电对交流网络的影响已经在实际运行中表现出来, 比如天广直流输电就出现交流电网电压波动大的问题<sup>[2]</sup>, 如何从全局调度交直流系统无功补偿及直流输电运行条件, 来使得考虑到电压指标、有功网损等因素的综合效益最好将是规划与调度部门需要考虑的问题。

本文提出了交直流混合系统的模型, 以网络理论为基础运算直流网络, 以功率作为交直流联系的纽带, 并运用粒子群算法对模型的控制量进行最优求解。

## 1 高压直流输电系统 (HVDC)

交直流系统是以换流站连接, 通常以换流站换流变压器初级绕组所连接的交流系统母线为分界, 将系统分为交流系统和直流系统。交流部分由发电机、变压器、交流线路组成, 直流部分由换流变压器、

整流器、逆变器、直流网络组成。

整流器和逆变器统称换流器, 换流器的控制方式多样, 有定电压控制 (CV)、定电流控制 (CC)、定功率控制 (CP)、定触发角控制 (CIA)、定熄弧角控制 (CEA) 等。其中, HVDC 中通常有一个换流站用于控制系统电压。为保证换流器的可靠触发和安全换相, 每个换流器都有最小触发角的限制, 整流器的最小触发角一般为  $5^\circ \sim 7^\circ$ ; 逆变器的最小熄弧角一般为  $14^\circ \sim 16^\circ$ 。由于换流阀的负荷能力有限, 每个换流器都有一个最大的限制电流  $I_{max}$ 。同时, 为保证电流的连续性, 每个换流器又有一个最小限制电流  $I_{min}$ 。图 1 为交直流系统图。

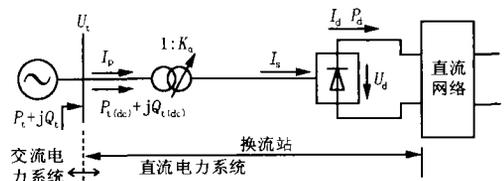


图 1 交直流系统

Fig 1 Hybrid AC/HVDC power system

如图 1, HVDC 满足下列方程组:

$$U_d = K_1 K_a U_t \cos \alpha - K_2 I_d X_c \quad (1)$$

$$I_s = K_3 \frac{3\sqrt{2}}{I_d} \quad (2)$$

$$N_b U_t I_p \cos \alpha = U_d I_d \quad (3)$$

$$U_d - K_4 K U_t \cos \alpha = 0 \quad (4)$$

$$P_{t(dc)} = N_b U_t I_p \cos \alpha = U_d I_d \quad (5)$$

$$Q_{t(dc)} = P_{t(dc)} \tan \alpha \quad (6)$$

式中:  $U_d$ 、 $U_t$  为换流站直流电压和换流站交流母线电压, 为逆变器时  $U_d$  取负号;  $I_d$ 、 $I_p$ 、 $I_s$  为直流电流、换流变压器一次侧基波电流、换流变压器二次侧基

波电流;  $X_c$  为换相电抗;  $\alpha$  为控制角, 对整流器为触发延迟角, 对逆变器为熄弧角;  $\beta$  为换流器功率因数角;  $N_b$  为每极的串联电桥数;  $K$  为换流变压器变比;  $K_1 = \frac{3\sqrt{2}}{N_b}$ ;  $K_2 = \frac{3}{K}$ ;  $K_3$  为计及换相重叠现象而引入的系数, 一般取 0.995 可以达到足够的精度;  $K_4 = N_b K_3 \frac{3\sqrt{2}}{K}$ ;  $P_{t(dc)}$ 、 $Q_{t(dc)}$  为交流母线流向换流器的有功功率和无功功率。

## 2 交直流系统无功优化数学模型

### 2.1 目标函数

在有功调度已经给定的情况下, 以系统网损最小为目标, 以负荷节点电压质量、发电机节点无功出力、直流换流器电流为罚函数, 本文采用扩展的目标函数为:

$$\min F = P_{acL} + P_{dcL} + \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_1} \left( \frac{U_{li}}{U_{li\max} - U_{li\min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^{N_g} \left( \frac{Q_{Gj}}{Q_{Gj\max} - Q_{Gj\min}} \right)^2 + \lambda_3 \sum_{k=1}^{N_d} \left( \frac{I_{dk}}{I_{dk\max} - I_{dk\min}} \right)^2 \quad (7)$$

其中:

$$U_j = \begin{cases} U_j - U_{j\max} & U_j > U_{j\max} \\ 0 & U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max} \\ U_{j\min} - U_j & U_j < U_{j\min} \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_k = \begin{cases} Q_k - Q_{k\max} & Q_k > Q_{k\max} \\ 0 & Q_{k\min} \leq Q_k \leq Q_{k\max} \\ Q_{k\min} - Q_k & Q_k < Q_{k\min} \end{cases} \quad (9)$$

$$I_l = \begin{cases} |I_l| - I_{l\max} & |I_l| > I_{l\max} \\ 0 & I_{l\min} \leq |I_l| \leq I_{l\max} \\ I_{l\min} - |I_l| & |I_l| < I_{l\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $N_1$ 、 $N_g$ 、 $N_d$  分别为负荷节点总数、发电机节点总数、直流网络节点数;  $P_{acL}$  为交流系统有功损耗;  $P_{dcL}$  为直流系统有功损耗;  $U_{li}$ 、 $U_{li\max}$ 、 $U_{li\min}$  分别为负荷节点的电压、电压上限值和下限值;  $Q_{Gj}$ 、 $Q_{Gj\max}$ 、 $Q_{Gj\min}$  分别为发电机节点的无功出力、无功出力的上限值和下限值;  $I_{dk}$ 、 $I_{dk\max}$ 、 $I_{dk\min}$  分别为直流节点流经换流器的电流、电流的上限值和下限值;  $\lambda_1$  为负荷节点电压越界惩罚系数;  $\lambda_2$  为发电机无功出力越界惩罚系数;  $\lambda_3$  为直流电流越界惩罚系数。

在目标函数中: 第一项为交流有功损耗; 第二项为直流有功损耗; 第三项为对负荷节点电压越界的罚函数; 第四项为对发电机无功出力越界的罚函数;

第五项为对直流电流越界罚函数。

### 2.2 功率方程约束

功率约束方程, 即潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{li} - P_{t(dc)} = \\ U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = 1, \dots, N \\ Q_{Gi} + Q_{Cj} - Q_{li} - Q_{t(dc)} = \\ U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $N$  为系统总节点数;  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为交流系统发电机节点的有功功率和无功功率出力;  $P_{li}$ 、 $Q_{li}$  分别为负荷节点的有功和无功负荷功率;  $P_{t(dc)}$ 、 $Q_{t(dc)}$  分别为直流节点的有功和无功输入;  $Q_{Cj}$  为节点无功补偿容量;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和电压相角差。

### 2.3 变量约束

变量约束可分为控制变量约束和状态变量约束。选取发电机端电压  $U_G$ 、无功补偿节点补偿容量  $Q_C$ 、变压器分接头  $T_t$ 、控制电压  $U_d$ 、控制电流  $I_d$ 、控制功率  $P_d$  (触发角和熄弧角在本文作为给定条件:  $5^\circ \sim 7^\circ$  及  $14^\circ \sim 16^\circ$ ) 为控制变量, 发电机无功出力  $Q_G$ 、负荷节点电压  $U_l$ 、支路无功功率  $Q_z$ 、流经换流器电流  $I_d$ 、换流变压器变比  $K$  作为状态变量。

控制变量的约束:

$$\begin{cases} U_{Gi\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi\max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ Q_{Cj\min} \leq Q_{Cj} \leq Q_{Cj\max} & j = 1, 2, \dots, N_C \\ T_{tk\min} \leq T_{tk} \leq T_{tk\max} & k = 1, 2, \dots, N_t \\ U_{dl\min} \leq U_{dl} \leq U_{dl\max} & l = 1, 2, \dots, N_{dc} \\ I_{dn\min} \leq I_{dn} \leq I_{dn\max} & n = 1, 2, \dots, N_{dc} \\ P_{dn\min} \leq P_{dn} \leq P_{dn\max} & n = 1, 2, \dots, N_{dc} \end{cases} \quad (12)$$

状态变量的约束:

$$\begin{cases} Q_{Go\min} \leq Q_{Go} \leq Q_{Go\max} & o = 1, 2, \dots, N_g \\ U_{lp\min} \leq U_{lp} \leq U_{lp\max} & p = 1, 2, \dots, N_d \\ Q_{zq\min} \leq Q_{zq} \leq Q_{zq\max} & q = 1, 2, \dots, N_z \\ I_{dr\min} \leq I_{dr} \leq I_{dr\max} & r = 1, 2, \dots, N_{dc} \\ K_{s\min} \leq K_s \leq K_{s\max} & s = 1, 2, \dots, N_{dc} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $U_{Gi}$ 、 $U_{Gi\max}$ 、 $U_{Gi\min}$  分别为发电机节点的端电压、端电压上限值和下限值;  $Q_{Cj}$ 、 $Q_{Cj\max}$ 、 $Q_{Cj\min}$  分别为无功补偿节点补偿容量、补偿容量的上限值和下限值;  $T_{tk}$ 、 $T_{tk\max}$ 、 $T_{tk\min}$  分别为变压器可调分接头、分接

头上限值和下限值;  $U_{dl}$ 、 $U_{dl\max}$ 、 $U_{dl\min}$  分别为控制电压型换流器的电压、电压上限值和下限值;  $I_{dn}$ 、 $I_{dn\max}$ 、 $I_{dn\min}$  分别为控制电流型换流器的电流、电流上限值和下限值;  $P_{dn}$ 、 $P_{dn\max}$ 、 $P_{dn\min}$  分别为控制功率型换流器的功率、功率上限值和下限值;  $Q_{Go}$ 、 $Q_{Go\max}$ 、 $Q_{Go\min}$  分别为发电机节点无功出力、无功出力上限值和下限值;  $U_{lp}$ 、 $U_{lp\max}$ 、 $U_{lp\min}$  分别为负荷节点的电压、电压上限值和下限值;  $Q_{zq}$ 、 $Q_{zq\max}$ 、 $Q_{zq\min}$  分别为支路无功潮流、无功潮流的上限值和下限值;  $I_{dr}$ 、 $I_{dr\max}$ 、 $I_{dr\min}$  分别为流经换流器的电流、电流上限值和下限值;  $K_s$ 、 $K_{s\max}$ 、 $K_{s\min}$  分别为各换流器的变压器变比、变比上限值和下限值;  $N_c$ 、 $N_t$ 、 $N_z$  分别为补偿节点数、变压器可调分接头数、网络支路数。

### 3 算法研究

#### 3.1 交直流无功优化过程

PSO算法是以鸟群捕食行为为启发发展起来的,该算法将优化问题中的每一个可能解视为搜索空间中的一个“粒子”,根据对环境的适应度将群体中的个体(粒子)移动到好的区域。这些粒子在搜索空间中根据自身和同伴的飞行经验以一定的速度飞行,追随着当前的最优粒子,最终达到从全空间搜索最优解的目的。下面用 PSO 算法及交替求解法<sup>[5]</sup>实现交直流无功优化计算:

1) PSO 初始化  $N$  维控制量  $X$ ,  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ , 其中每个分量对应一个交直流控制量,即发电机端电压  $U_G$ 、无功补偿节点补偿容量  $Q_C$ 、变压器分接头  $T_t$ 、换流器控制电压  $U_d$ 、换流器控制电流  $I_d$ 、换流器控制功率  $P_d$ 。初始化得到  $m$  个随机粒子组成的初始粒子群,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。将每个  $X$  向量的分量分离为对应的交直流控制量。

2) 由初始种群分离出直流部分控制量  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $P_d$ , 进行直流潮流计算。

a 运用如下高斯-塞德尔方程迭代求得功率控制换流器电压:

$$U_{di}^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} r_{ij} \frac{P_{dj}^s}{U_{dj}^{k+1}} + \sum_{j=i}^{n-1} r_{ij} \frac{P_{dj}^s}{U_{dj}^k} + \sum_{j=n}^{l-1} r_{ij} I_{dj} + U_{di}$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K_{\max} \quad (14)$$

当  $|U_{di}^{k+1} - U_{di}^k| < \epsilon$  时迭代收敛, 停止迭代得到电压值; 当迭代到最大代数不收敛, 直流潮流计算失败。其中,  $U_{di}$  为第  $i$  节点的电压;  $r_{ij}$  为网络阻抗矩阵元素;  $P_{dj}^s$  为直流功率控制量;  $I_{dj}$  为直流电流控制量;  $n$ 、 $l$ 、 $k$ 、 $K_{\max}$  为功率控制节点数、直流网络节点数、迭代次数和迭代最大次数;  $U_{di}$  为直流网络中的电压控

制节点电压, 即基准电压;  $\epsilon$  为迭代电压差阈值。

b 当迭代得到功率控制节点电压值, 即用下式得到电流控制节点电压:

$$U_{di} = \sum_{j=0}^{n-1} r_{ij} \frac{P_{dj}^s}{U_{dj}} + \sum_{j=n}^{l-1} r_{ij} I_{dj} + U_{di}$$

$$m - 1 < i < l \quad (15)$$

c 由各点求得的  $U_d$ , 运用高斯求解法求得各点电流  $I_d$ , 电压控制节点电流由网络电流和为 0 求得, 并进一步求得各点的功率  $P_d$ 。

d 根据求得的  $U_d$ 、 $I_d$  以及给定的  $r_{ij}$ 、 $X_c$ , 由式 (1) 求得各点的  $K U_t$  值。

e 把求得的  $K U_t$  和  $U_d$  代入式 (4), 求得  $P_{t(dc)}$ 。进而由式 (5)、(6) 求得  $P_{t(dc)}$  和  $Q_{t(dc)}$ 。

3) 由上述直流网络求得的有功功率  $P_{t(dc)}$  和无功功率  $Q_{t(dc)}$  从交流网络看可以视为负荷改变量, 即为  $P_{t(dc)} + jQ_{t(dc)}$ , 则交流网络中该节点的负荷为:

$$P_t + jQ_t = P_t + jQ_t + P_{t(dc)} + jQ_{t(dc)} \quad (16)$$

4) 交流潮流计算得出各节点的电压  $U_t$ , 由已求得的  $K U_t$  求出直流网络各节点的  $K$ , 并判断其范围得到惩罚因子  $\lambda$ :

$$\lambda = 1, \text{ 当 } K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$$

$$\lambda = 10, \text{ 当 } K < K_{\min} \text{ 或 } K_{\max} < K$$

5) 通过求得的交直流量按式 (7) 计算目标函数  $F$ , 得到适应度函数  $F_f = F$ , 根据  $F_f$  的大小来判断  $X_i$  的优劣。记第  $i$  个粒子迄今为止搜索到的最优位置为  $X_{p_i} = (x_{p_i1}, x_{p_i2}, \dots, x_{p_iN})$ , 该位置适应度值为  $F_{best_i}$ , 记粒子群迄今为止搜索到的最优位置为  $X_g = (x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gN})$ , 该位置适应度值为  $g_{best}$ , PSO 采用如下公式对粒子进行操作:

$$V_i(k+1) = wV_i(k) + c_1 \text{rand}() (X_{p_{id}} - X_{id}) + c_2 \text{rand}() (X_{gd} - X_{id}) \quad (17)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (18)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $d = 1, 2, \dots, M$ ,  $k$  为迭代次数, 加速因子  $c_1$  和  $c_2$  及惯性因子  $w$  为非负常数;  $\text{rand}()$  为  $[0, 1]$  之间的随机数; 粒子速度  $V_j(k) \in [-V_{\max}, V_{\max}]$  为预先设定的粒子最大飞行速度。

6) 收敛判断, 当优化结果  $N$  代不改变则收敛, 得到优化结果。否则, 将新生成的粒子群带入步骤 2) 进行计算。

#### 3.2 交直流系统无功优化流程图

流程图如图 2 所示。

### 4 算例分析

本文采用的算例是 Mustafa, M. W 于 2000 年在

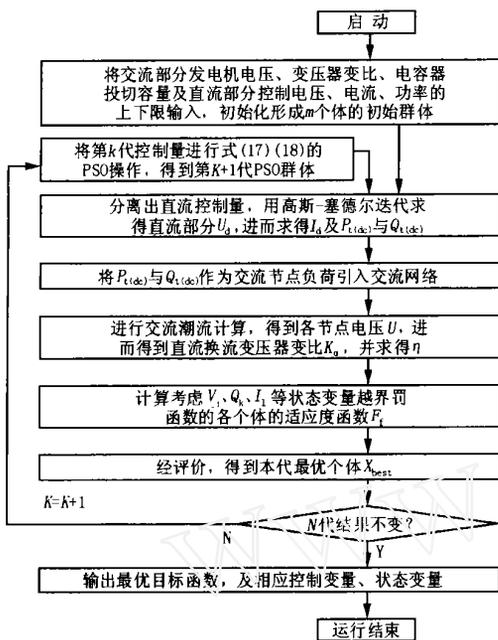


图 2 交直流系统无功优化框图

Fig 2 Flow chart of the reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system

IEEE上发表的交直流算例<sup>[3]</sup>。

1) 仿真条件。本算例用 VC 编制仿真软件进行调试计算。基准功率  $S_B = 100 \text{ MVA}$ , 电路如图 3, 各参数见文献 [3]。PSO 算法参数选为: 群体规模  $m = 20$ , 惯性因子  $w = 0.9$ , 加速因子  $c_1 = c_2 = 2.0$ 。

本文考虑当 8、9 节点的负荷有功增加到 1.2 和 1.3, 此时的电压已经出现偏低 (节点 5 越界), 有功网损为 0.360 4。在 4、5 节点加无功补偿, 容量上、下限分别为 0.10、0.30 和 0.0。

2) 仿真结果: 30 次的运算得到的目标函数均在 0.281 ~ 0.285 之间, 取最小的结果作为优化结果控制量如表 1 所示, 仿真计算得到优化结果如表 2。其中, 4、5 节点换流器吸收无功功率为 0.255 和 0.195, 表 1 中为扣除直流消耗无功后的无功补偿量。

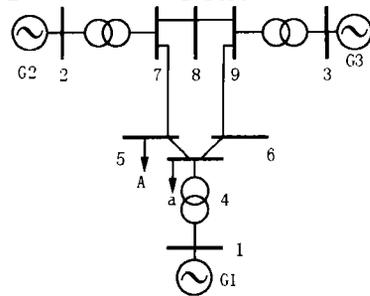


图 3 9 节点交直流系统

Fig 3 A 9 nodes hybrid AC/HVDC power system

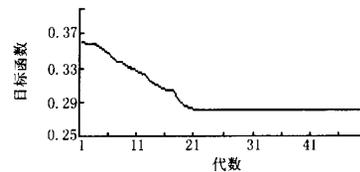


图 4 优化收敛特性图

Fig 4 Convergence characteristics of the optimization

表 1 9 节点交直流系统控制量优化结果

Tab 1 Optimization result of 9 nodes AC/HVDC system controlling variables

控制量	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$T_{1-4}$	$T_{2-7}$	$T_{3-9}$	$Q_{c4}$	$Q_{c5}$	$U_{d4}$	$P_{d5}$
结果	1.092	1.100	1.078	0.975	0.950	1.000	0.041	0.170	1.345	0.631

表 2 9 节点优化结果与初始潮流对比

Tab 2 Optimization result of 9 nodes AC/HVDC system compared with original power flow

	有功网损	负荷节点电压								
		$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9$
优化前	0.360 4	1.040	1.025	1.026	0.976	0.896	0.900	0.963	0.937	0.980
优化后	0.281 3	1.092	1.100	1.078	1.060	1.016	0.959	1.036	1.005	1.028

同时, 4、5 节点换流变压器变比为 1.05、1.05。可见, 优化后可以有效地降低网损失, 同时节点电压也满足运行约束条件。计算收敛结果如图 4。

### 5 结论

1) 随着直流输电工程的增多, 宏观调度交直流

混合输电系统所带来的综合效益将会越来越大, 其意义也更加重大。本文建立了交直流混合输电系统的无功优化数学模型, 并通过 IEEE 算例证明其可行性。

2) 本文提出了一种基于 PSO 的交直流混合输电系统无功优化的求解算法, 算例证明该算法能有

效得出交直流混合输电系统的无功优化结果,也表明了该算法是收敛和有效的。

#### 参考文献:

- [1] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-3.  
SHU Yin-biao. Present Status and Prospect of HVDC Transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-3.
- [2] 林俊昌,莫文雄. 天广直流输电系统对广东电网的影响 [J]. 广东电力, 2003, 16(1): 10-13.  
L N Jun-chang, MO Wen-xiong. Influence of Tian-Guang DC Transmission System on Guangdong Power Network [J]. Guangdong Electric Power, 2003, 16(1): 10-13.
- [3] Mustafa M W, Kadir A F A. A Modified Approach for Load Flow Analysis of Integrated AC-DC Power Systems[A]. IEEE Proceedings 2000. 108-113.
- [4] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[A]. Proc of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science Nagoya(Japan): 1995. 39-43.
- [5] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer[A]. IEEE World Congress on Computational Intelligence 1998. 1951-1957.
- [6] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [7] Clerc M, Kennedy J. The Particle Swarm Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [8] 诸骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 1994.  
ZHU Jun-wei. Power System Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [9] 叶廷路. 葛南直流输电系统的运行与控制 [J]. 电网技术, 1994, 18(1): 20-25.  
YE Ting-lu. The Operation and Control of Ge-Nan HVDC Transmission System [J]. Power System Technology, 1994, 18(1): 20-25.
- [10] 李智勇,王海军,余乐. 葛南直流输电系统 1998年运行情况分析 [J]. 电网技术, 1999, 23(7): 66-69.  
LI Zhi-yong, WANG Hai-jun, YU Le. Analysis of Ge-Nan HVDC Transmission System Operation in 1998 [J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 66-69.
- [11] 陆进军,黄家裕. 一种高效灵活的电力系统多端直流潮流算法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 48-51.  
LU Jin-jun, HUANG Jia-yu. A Versatile Multiterminal HVDC Power Flow Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 48-51.
- [12] 侯云鹤,鲁丽娟,熊信良,等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济分配中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.  
HOU Yun-he, LU Li-juan, XIONG Xin-yin, et al. Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application on Economic Dispatch of Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [13] 袁晓辉,王乘,张勇传,等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.  
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan, et al. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power System [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [14] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京:水利电力出版社, 1990.  
DAI Xi-jie. The Base of DC Transmission System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.

收稿日期: 2005-06-21; 修回日期: 2005-08-31

#### 作者简介:

彭磊 (1981 - ) ,男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中的应用; E-mail: queenguard@163.com

吴耀武 (1963 - ) ,男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划;

熊信良 (1945 - ) ,男,教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中应用。

### Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system

PENG Lei, WU Yao-wu, XIONG Xin-yin, LOU Su-hua

(Department of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper presents a reactive power optimization model of hybrid AC/HVDC power system. The control variables not only contains the reactive power output of generators, compensating quantity of capacities and regulating quantity of transformer of the AC system, but also contains the controlling voltage, current, power of the HVDC current-source converters and regulating quantity of the step-up transformers. The model applies PSO to deal with the optimization. The examples of 9 nodes system from IEEE show that the model is correct and the algorithm is convergent and effective.

**Key words:** reactive power optimization; hybrid power system; HVDC; PSO