

一种求解动态无功源正向有效无功储备的自适应粒子群改进算法

建立了无功源正向有效无功储备求解模型,并提出了一种能获得各动态无功源正向无功储备的改进自适应粒子群算法,把动态改变惩罚系数的惩罚函数与自适应粒子群算法相结合,有效克服粒子群算法的早熟问题。不同于以往整个电力系统负荷增长因子 λ 统一的单一变化模式,求解模型中每个负荷节点负荷因子 λ 各自独立变化,由此求取各无功源正向有效无功储备更符合系统运行实际情况。利用 New England 39 节点系统进行了 5 种典型运行方式下的计算分析,分析结果对于保证电力系统安全、经济运行有一定的指导意义。

唐茹彬¹ 刘宝柱¹ 蒲天骄² 于汀² 王建宇^{1/1} 1.华北电力大学电气与电子工程学院 2.中国电力科学研究院

能发挥作用的无功储备,并指出有效无功储备是保证系统电压稳定性的关键;文献[6]从有效性和方向性两个角度,把动态无功源无功储备定义为 4 种,其中动态无功源正向有效无功储备指的是在其无功出力增加的情况下能够发挥作用的无功储备。本文主要研究动态无功源正向有效无功储备,也可以看成是研究电力系统负荷增加时,动态无功源无功出力的增加情况。在以往研究无功储备及其相关方向的模型中^[5-9],整个系统负荷因子 λ 只有一个,负荷因子随着负荷状况由轻负荷至重负荷,依次增大。本文无功储备模型中每个负荷节点负荷因子 λ_i 各自独立变化,不再强制按统一负荷增长方式。旨在穷尽负荷各种变化方式,计算在此过程中发电机的最大无功出力。

0 引言

随着社会的进步、经济的发展,我国对电能的需求越来越大,对电能质量的要求也越来越高。考虑到建立新电力线路的成本和电网发展等问题,我国现有的用电设备通常在最大限度内被利用,这使很多地区,尤其是发达地区的电力线路常处于重负荷水平下。重负荷情况下,系统电压稳定裕度降低,很容易导致电压崩溃^[1]。

无功优化是提高电能质量,保证电力系统安全、经济运行的有效措施。无功储备研究是无功优化的一个方向,保有一定的无功储备可以使电力系统更好地应对重负荷以及其他极端运行情况。最初,定义动态无功源无功储备为其最大无功出力与当前无功出力之差^[2-3]。文献[4]引入了动态无功源有效无功储备的概念;文献[5]将有效无功储备定义为在各种运行方式下

1 动态无功源正向有效无功储备求解模型

在电力系统实际运行中,动态无功源发出最大无功出力通常达不到其无功上限,俗称“窝电”现象。

动态无功源正向有效无功储备的值可以表示为动态无功源在各种情况下(系统运行方式、负荷水平和预想故障集变化时)发出的最大无功出力减去基础正常运行状态下的无功出力。基础正常运行状态是指标准节点系统给定的有功、无功负荷条件下,该系统的运行状态,即后文中 $\lambda=1$ 时运行状态,简称为基态。基态下动态无功源的无功出力可以直接通过潮流计算求出,因此求取其正向有效无功储



唐茹彬/硕士研究生

关键词/Keywords

动态无功源 ·
惩罚函数 ·
粒子群算法 ·
无功储备 ·

备可以看成是求取在满足电压幅值约束以及动态无功源有功出力、无功出力上下限约束下,发电机的实际最大无功出力。

求取动态无功源正向有效无功储备的数学优化模型为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i \in S_R} w_i Q_i \quad (1) \\ \text{s.t.} \\ & P_{Gi}^k - \lambda_{Pi}^k P_{Li}^k - U_i^k \sum_j U_j^k (G_{ij}^k \cos \delta_{ij}^k + B_{ij}^k \sin \delta_{ij}^k) = 0, \\ & \quad i \in S_B \\ & Q_{Gi}^k - \lambda_{Qi}^k Q_{Li}^k - U_i^k \sum_j U_j^k (G_{ij}^k \sin \delta_{ij}^k - B_{ij}^k \cos \delta_{ij}^k) = 0, \\ & \quad i \in S_B \\ & \underline{U}_i^k \leq U_i^k \leq \overline{U}_i^k, i \in S_B \\ & \underline{P}_i^k \leq P_i^k \leq \overline{P}_i^k, i \in S_A \\ & \underline{Q}_i^k \leq Q_i^k \leq \overline{Q}_i^k, i \in S_R \end{aligned}$$

式中, Q_i 为动态无功源 i 的无功出力; w_i 为动态无功源 i 无功出力的权重; λ_{Pi} 、 λ_{Qi} 分别为节点 i 对应的有功、无功负荷因子; S_B 为所有节点的集合; S_A 为所有有功电源集; S_R 为所有无功电源集; U_i 和 δ_i 分别为节点 i 的电压幅值和相角; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功和无功负荷; P_{Gi} 为节点 i 的有功出力; Q_{Gi} 为节点 i 的无功出力; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为支路 $i-j$ 的导纳; 带上划线和下划线的变量分别表示相应变量的上下限; 上标 k 表示运行状态 k , 其值遍历正常运行状态和相关故障运行状态。

当 λ_i 变化时, 系统的负荷不断变化, 为使系统中的有功功率平衡, 发电机节点中的平衡节点必然要增加或者减少有功出力来平衡系统中的有功不平衡量。如果 λ_i 变化过大, 使系统中的有功负荷大幅度增加, 仅仅依靠增加平衡节点有功出力无法满足系统的有功需求, 就需要对发电机有功出力进行再分配。

把 $\lambda_i = 1$ 且无任何故障时的情况称作基态, 那么, 基态时系统的有功平衡方程为

$$P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0, \quad i \in S_B \quad (2)$$

采取按比例分配有功负荷, β_i 为节点 i 上发电机分担的有功功率份额, 则有

$$\beta_i = \frac{P_{Gi}}{\sum_{i \in S_A} P_{Gi}} \quad (3)$$

则除平衡节点发电机以外的发电机有功出力为

$$P_{Gi}^k = \beta_i \sum_{i \in S_B} \lambda_{Pi}^k P_{Li}^k \quad (4)$$

其余有功不平衡量, 由担当平衡节点的发电机承担。

在式 (1) 中, 潮流方程作为等式约束, 有功、无功出力上下限约束和节点电压幅值上下限约束为不等式约束。在大多数非线性优化问题中, 这些约束被以罚函数的形式添加到目标函数中^[10-11]。把有功、无功出力上下限约束和节点电压幅值上下限约束写入目标函数, 于是动态无功源正向有效无功储备的数学优化模型的目标函数为

$$\begin{aligned} F_Q = \min & (-w_i Q_i + q_1 h (\sum_{i \in S_A} (\overline{P}_{Gi} - P_{Gi})^2 + \\ & \sum_{i \in S_R} (\overline{Q}_{Gi} - Q_{Gi})^2) + \\ & q_2 h \sum_{i \in S_B} (|U_i - \overline{U}_i| + |U_i - \underline{U}_i|)) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $h(\sum_{i \in S_A} (\overline{P}_{Gi} - P_{Gi})^2 + \sum_{i \in S_R} (\overline{Q}_{Gi} - Q_{Gi})^2)$ 、

$h \sum_{i \in S_B} (|U_i - \overline{U}_i| + |U_i - \underline{U}_i|)$ 为惩罚项, 用来确保发

电机发出的有功、无功功率和各节点电压不越限, 由于目标函数为求动态无功源正向有效无功储备, 此时有功、无功出力不可能处于较低的值, 所以罚函数中没有包含有功、无功出力的下限; q 为一个多级分配函数, 其取值与惩罚项的值有关, 这里 q_1 取值为 500, q_2 取值为 20; h 为惩罚函数的惩罚系数, 随迭代次数动态改变, 设定如果迭代次数大于 50, 每当相邻两代最优适应值没有明显改进时 (取两次最优适应值相差不超过 0.01), 惩罚系数 h 增大至 1.4 倍^[11]。惩罚函数的惩罚值过高可能导致过度惩罚, 优化结果过早收敛, 可能收敛于局部最小值; 惩罚值过低,

惩罚机制发挥不了作用, 不等式约束失效, 很难发现可行的最优解, 因此惩罚值的设定需合理。

2 自适应粒子群改进算法

2.1 标准粒子群算法

粒子群算法是一种启发式随机优化算法, 每个粒子追逐自身种群最优位置和全局最优位置搜索, 但是这种搜索带有随机性^[12]。通过这种随机搜索, 粒子最终会收敛于群体最优粒子, 粒子对应的适应值函数达到最优。在粒子群算法中, 每个粒子的速度和位置根据特定的规则进行更新。在 n 维搜索空间, 取 m 个粒子, 每个粒子按照式 (6)、式 (7) 来更新, 即

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{pd}^t - x_{id}^t) \quad (6)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (7)$$

式中, v 为粒子的速度, $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$; x 为粒子的位置; p_{id} 为种群局部最优粒子位置; p_{pd} 为全局最优粒子位置; $d=1, 2, \dots, n$, 表示粒子的第 d 维; $i=1, 2, \dots, m$, 表示第 i 个粒子, m 为种群数; t 为当前进化代数; ω 为惯性权重; r_1 、 r_2 为均匀分布在 $[0, 1]$ 的随机数; c_1 、 c_2 为学习因子, 本文都取为 2。

2.2 自适应粒子群算法

任何可行的优化算法都必须保证两点: 能够找到全局最优点, 有较高的收敛速度。为了避免标准粒子群算法可能的早熟问题, 在标准粒子群算法的基础上引入了变异、交叉算子, 提高了种群的多样性。同时, 通过自适应调节惯性权重有效平衡了收敛速度和收敛准确度。

2.2.1 提高种群多样性

采取文献[13]中提出的种群多样性度量方法, 定义平均粒距, 即

$$D(t) = \frac{1}{mL} \sum_{i=1}^m \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{id} - \bar{x}_d)^2} \quad (8)$$

式中, L 为搜索空间对角最大长度; m 为种群规模; n 为解空间维数; t 为当前进化代数; x_{id} 为第 i 个粒子在第 d 维的位置坐标; $\bar{x}_d$ 为所有粒子第 d 维的位置坐标平均值。平均粒距表示种群中各粒子相互之间分布的离散程度, 其值越大, 表示种群越分散, 种群的多样性越好。

为了保持种群的多样性, 在基本粒子群算法中引入变异算子、交叉算子, 保证搜索过程中粒子位置在尽量大的范围内取值。由于平均粒距越小, 种群多样性越差, 于是设定平均粒距阈值 $D_{\min}$, 当平均粒距小于 $D_{\min}$ 时, 对粒子进行变异交叉处理。具体操作方法为: 保留历史最优粒子位置, 对粒子速度按照一定的变异率重新随机初始化, 得到新的粒子速度, 根据式 (7) 得到新的粒子位置, 再对粒子位置按照一定的交叉率进行交换, 形成新的种群, 最后进入新一轮计算。粒子变异交叉的具体公式为

$$v_{id} = \begin{cases} v_{\min} + r(v_{\max} - v_{\min}), & r_{li} < p_m \\ v_{i-1,d}, & r_{li} \geq p_m \cap i \neq 1 \\ v_{m,d}, & r_{li} \geq p_m \cap i = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{id} = \begin{cases} x_{i-1,d}, & r_{2i} < p_c \cap i \neq 1 \\ x_{m,d}, & r_{2i} < p_c \cap i = 1 \\ x_{id}, & r_{2i} \geq p_c \end{cases} \quad (10)$$

式中, r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; r_{li} 为对应粒子速度各维的分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; r_{2i} 为对应粒子位置各维的分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; p_m 为变异率; p_c 为交叉率。

通过以上变异交叉操作, 能够有效保持种群多样性, 提高粒子群算法的全局搜索能力。

2.2.2 惯性权重的自适应调整

文献[14]第一次将惯性权重 ω 引入粒子群算法。惯性权重决定了粒子先前速度对当前速度的影响程度, ω 取较大值时, 粒子速度变化较快, 能够尽快在全局范围内搜索, 有利于提高算法收敛速度。 ω 取较小值时, 粒子速度变化较慢, 能够在局部范围内尽量多选取位置值, 有利于提高算法收敛准确度, 惯性权重可以起到平衡算法全局搜索和局部搜索能力的作用。

通过合理地设置 ω 的值, 可以有效提高算法的搜索效率。很多文献中, 惯性权重的调整方式为仅随着迭代次数的增加, 让惯性权重 ω 从 1.4 到 0.4 线性减小, 与种群多样性没有联系。本文应用文献[15]提出自适应调整策略对 ω 按照式 (11) 进行调整, 根据种群多样性的变化调整惯性权重。根据式 (11), 惯性权重 ω 随着平均粒距的增大而增大, 随着平均粒距的减小而减小。当平均粒距和惯性权重取较大值时, 种群粒子位

置取值较为分散,更有利于全局范围内的快速搜索;当平均粒距和惯性权重取较小值时,种群粒子位置取值较为集中,更有利于局部范围内的精细搜索。通过种群多样性的变化,自适应调节惯性权重 ω ,算法的搜索速度和搜索准确度都能得到有效提高。

$$\omega = \frac{1}{1 + e^{-12[D(t) - 0.5]}}$$

(11)

自适应粒子群算法的基本运算过程为:首先随机初始化种群中粒子,此时种群多样性较好,搜索范围较广,搜索速度很快,经迭代可快速搜索到相对较优的位置;随着迭代次数增加,种群中粒子位置根据已有最优粒子进行更新,多样性逐渐变差,搜索范围减小,搜索准确度增加;直到 $D < D_{\min}$,开始对种群粒子进行交叉变异处理,提高种群多样性,再次进行全局快速搜索,当种群多样性信息变差达到阈值时,再次对种群粒子进行交叉变异处理,如此循环,最终在一定的迭代次数内取得最优粒子,得到粒子最优适应值。

3 算例分析

选择 New England 10 机 39 节点系统(如下图所示)作为测试系统,进行动态无功源正向有效无功储备研究,用 Matlab 编写了改进自适应粒子群算法动态无功源正向有效无功储备计算程序。在算法中相关参数的选取分别为:电压幅值范围为 0.92~1.08,种群规模 $m=50$,粒

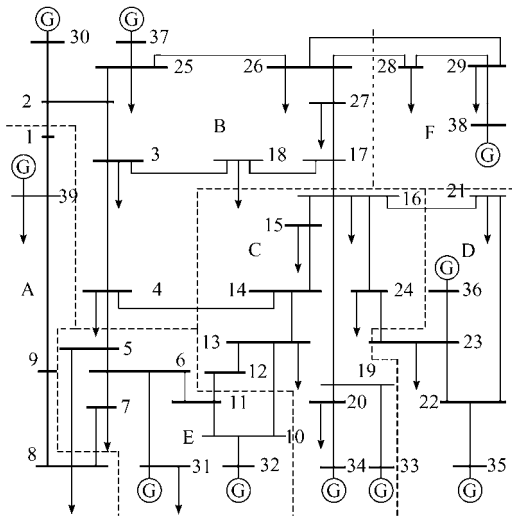


图 New England 39 节点系统接线及分区图

子维数 $n=38$ (负荷恒功率因数时为 19 维),最大迭代次数 $\text{iter}_{\max}=800$,交叉率 $p_c=0.7$,变异率 $p_m=0.05$,平均粒距阈值 $D_{\min}=0.2$,负荷因子 $\lambda \in [1,5]$,粒子最大飞行速度 $V_{\max}$ 取控制变量取值范围的 20%,基准功率为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

New England 39 节点系统有 10 台发电机组,系统中发电机有功、无功出力上下限值见参考文献[16]。在不同负荷状况、不同发电机节点电压、不同故障状况和分区的情况下,分别计算了各动态无功源的正向有效无功储备。

3.1 有功、无功负荷独立变化

系统中各节点电压幅值范围为 0.92~1.08,系统中各负荷节点有功、无功负荷各自无规律变化,不考虑各种故障情况,仅改变负荷功率,负荷因子 $\lambda \in [1,5]$,即各负荷节点有功、无功功率按照基态有功、无功功率的 1~5 倍变化。负荷因子 λ 上限取 5 主要有两方面原因:一方面如果负荷因子过小,无法有效研究负荷增加时动态无功源无功出力的变化;另一方面如果负荷因子过大,运行过程中可能出现与动态无功源直接相连负荷节点无功负荷过大,使动态无功源无功出力大部分用于就地补偿该节点而无法传输至其他负荷节点的情况。

分别运行 20 次程序,取 20 次运行结果的平均值和最大值,运行结果如表 1 所示(*号表示最大无功出力为无功出力上限)。

表 1 有功、无功负荷各自变化下无功源无功出力情况

标号	节点号	节点电压 (pu)	基态无功出力 (pu)	无功出力上限 (pu)	最大无功出力 (pu)	
					平均	最优
1*	30	1.047 5	1.449 3	2.11	2.110 0	2.110 0
2	31	0.982 0	2.068 6	6.91	4.400 3	4.455 3
3	32	0.983 1	2.057 1	4.52	4.441 1	4.511 0
4	33	0.997 2	1.089 7	4.41	3.215 9	3.270 1
5*	34	1.012 3	1.670 0	3.67	3.670 0	3.670 0
6*	35	1.049 3	2.111 6	4.52	4.520 0	4.520 0
7	36	1.063 5	1.004 7	3.98	3.000 0	3.015 6
8	37	1.027 8	0.006 5	3.86	1.737 6	1.779 2
9	38	1.026 5	0.226 7	5.61	3.853 6	3.872 7
10	39	1.030 0	0.878 8	6.63	3.138 6	3.225 3

表 1 中, 20 次计算平均值与 20 次计算最优值有一定的差别, 在可接受的范围内, 证明了该粒子群算法的有效性。每次运行结果有差别是粒子群算法本身特点造成的, 算法本身具有一定的随机性, 且程序中粒子维数较大 (38 维), 计算比较复杂。要使计算结果每次差别尽量减小, 需进一步改进算法。

由运行结果可知, 1 号、5 号和 6 号动态无功源最大无功出力可以达到其上限值, 3 号无功源最大无功出力接近其上限值, 其他无功源最大无功出力均与其上限值有一定差距, 即 2 号、4 号、7 号、8 号、9 号和 10 号无功源无功储备没有得到有效的利用。为了验证上述“窝电”现象是电力系统本身各种约束造成而非算法误差造成, 分别把 2 号、4 号、7 号、8 号、9 号和 10 号无功源无功出力上限改为 4.40、3.20、3.00、1.70、3.80 和 3.15 (接近表 1 中各发电机无功源的最大无功出力), 再次运行程序分别求各动态无功源最大无功出力。运算结果为: 各动态无功源无功出力最大值可以达到设定无功出力上限, 进一步证明了该自适应粒子群算法动态无功源有效无功储备计算程序的有效性。同时可以得出结论: 动态无功源无功出力大小不仅与负荷变化、系统参数变化和电压约束有关, 也与无功源有功无功出力限值有一定的关系, 无功源有功无功出力限值也会对其他无功源无功出力造成影响。对合理利用动态无功源无功储备、是否增设无功补偿设备具有一定的指导意义。

3.2 有功、无功负荷按恒功率因数变化

在 3.1 节的基础上, 使负荷恒功率因数变化, 即令 $\lambda_{p_i} = \lambda_{Q_i}$, 使粒子维度由 38 维降为 19 维, 运行结果如表 2 所示。

负荷恒功率因数变化时, 各动态无功源最大无功出力与表 1 中数据相比, 明显减小, 只有 1 号无功源最大无功出力达到其上限值。因为负荷恒功率因数变化的情况下, 要求负荷节点无功负荷和有功负荷必须保持相同的增长率, 而由于发电机有功出力上限的限制 (基态系统发电机发出有功出力总和约为 6 190 MW, 而系统发电机有功出力上限总和为 7 665 MW), 有功负荷的增长非常有限, 进而无功负荷的增长也非常有限, 运行结果显示粒子最优位置每一维 λ 不超过 3。

表 2 负荷恒功率因数变化下无功源无功出力情况

标号	节点号	节点电压 (pu)	最大无功出力 (pu)	
			平均	最优
1*	30	1.047 5	2.108 9	2.110 0
2	31	0.982 0	3.823 0	3.860 7
3	32	0.983 1	3.875 8	3.928 4
4	33	0.997 2	2.047 8	2.062 6
5	34	1.012 3	2.736 7	2.779 5
6	35	1.049 3	3.679 7	3.710 7
7	36	1.063 5	1.996 8	2.019 6
8	37	1.027 8	1.279 7	1.300 4
9	38	1.026 5	1.639 2	1.661 0
10	39	1.030 0	2.064 8	2.158 8

3.3 分区计算无功储备

按照文献[17]给出的分区结果对 39 节点系统进行分区, 该方法基于节点间的无功耦合进行分区, 保证了分区内无功功率的平衡。把 39 节点系统分为 A、B、C、D、E 和 F 共 6 个区 (见上图), 分别求取分区内无功出力总和最大值, 运行结果如表 3 所示, 表 3 中显示的值为粒子群算法计算 20 次取的平均值。

表 3 各分区总无功出力情况

分区号	分区内包含的无功源节点	分区内总无功出力最大值 (pu)	
		$\lambda_{p_i} = \lambda_{Q_i}$ 时	$\lambda_{p_i} \neq \lambda_{Q_i}$ 时
A	39	3.138 6	2.064 8
B	30、37	3.857 8	3.088 3
C	33、34	6.848 6	4.685 6
D	35、36	7.507 1	5.442 6
E	31、32	8.907 0	7.725 0
F	38	3.853 6	1.639 2

在负荷节点有功、无功负荷各自变化 ($\lambda_{p_i} \neq \lambda_{Q_i}$) 的情况下, 分区无功出力总和最大值基本等于表 1 中各发电机动态无功源最大无功出力总和; 在负荷恒功率因数变化 ($\lambda_{p_i} = \lambda_{Q_i}$) 的情况下, 分区无功出力最大值小于表 2 中各无功源最大无功出力总和。由此可知, 负荷增长方式会对分区内无功功率的供蓄能力造成影响。

3.4 断开关键支路时的无功储备计算

前 3 小结的算例中不考虑系统的故障情况, 本节在 39 节点系统中选取一些关键支路, 在断

开关键支路的情况下，分析动态无功源最大无功出力的变化情况。选取两条支路：15-16 支路、21-22 支路。15-16 支路为基态时流过无功功率最大的线路，由 15 节点流向 16 节点的无功功率为-1.470 6 pu；21-22 支路为基态时流过有功功率最大的线路，由 21 节点流向 22 节点的有功功率为-5.907 6 pu。在 $\lambda_{p_i} = \lambda_{Q_i}$ 的情况下，分别断开 15-16 支路、21-22 支路，运算结果如表 4 所示。表 4 中显示的值为粒子群算法计算 20 次取的平均值。

表 4 断开关键支路后无功源无功出力情况

标号	节点号	节点电压 (pu)	最大无功出力 (pu)	
			断开 15-16	断开 21-22
1*	30	1.047 5	2.110 0	2.110 0
2	31	0.982 0	3.387 5	3.455 6
3	32	0.983 1	3.751 9	3.800 8
4	33	0.997 2	1.465 1	2.710 2
5	34	1.012 3	2.588 6	3.191 5
6	35	1.049 3	3.305 9	3.113 5
7	36	1.063 5	1.760 3	2.365 4
8	37	1.027 8	1.283 7	1.554 5
9	38	1.026 5	1.604 7	2.010 3
10	39	1.030 0	1.991 2	1.738 5

由表 4 中数据可知，当断开 15-16 支路时，各无功源最大无功出力与不断开 15-16 支路相比，均有所减小（除 1 号无功源已到达无功出力上限）；当断开 21-22 支路时，各无功源最大无功出力与不断开 21-22 支路相比，有增有减。由此可知，电力系统的故障可能会影响动态无功源最大无功出力。断开 15-16 支路时各无功源最大无功出力减小原因可能是由于 15-16 支路是基态流过无功功率重要支路，在恒功率因数负荷条件下求取动态无功源最大无功出力，最优位置 λ 取值比较小，15-16 支路依然是流过无功潮流重要支路，从而 15-16 支路的断开影响了无功功率在系统内的传输，使各无功源有效无功储备减小。

3.5 改变分区内节点电压时无功储备计算

在 3.2 节的基础上，改变分区内动态无功源端电压，研究其最大无功出力变化情况。取 E 区内无功源节点 31、节点 32 电压为上限值 1.08，程序运行结果如表 5 所示，表 5 中显示的值为粒

子群算法计算 20 次取的平均值。

表 5 改变 2 号、3 号无功源端电压后各无功源无功出力情况

标号	节点号	节点电压 (pu)	最大无功出力 (pu)
1	30	1.047 5	1.417 5
2	31	1.080 0	4.524 4
3*	32	1.080 0	4.520 0
4	33	0.997 2	1.415 5
5	34	1.012 3	2.536 6
6	35	1.049 3	3.102 9
7	36	1.063 5	1.688 1
8	37	1.027 8	0.882 9
9	38	1.026 5	1.382 7
10	39	1.030 0	0.758 1

由表 5 可知，节点 31、节点 32 最大无功出力大幅度增加，3 号无功源直接达到无功出力上限值，其余无功源最大无功出力明显减小。由此可见，增加无功源节点的电压可以使其发出的无功功率大幅度增加，提高了该无功源的有效无功储备。

4 结束语

将动态改变惩罚系数的惩罚函数与自适应粒子群算法结合起来，有效改进了粒子群算法的早熟问题，同时大大提高了算法的收敛速度。建立了动态无功源正向有效无功储备求解模型，编写了满足节点电压、有功无功出力上下限约束的自适应粒子群算法动态无功源有效无功储备计算程序，将程序应用于 New England 39 节点系统。在不同的负荷增长方式下研究了动态无功源最大无功出力情况，得出结论：在负荷有功、无功各自无规律变化的情况下，动态无功源无功出力能达到较大的值，而负荷恒功率因数变化的情况下，无功源无功出力最大值较小，不利于无功储备的有效利用；另外，电力系统线路故障、节点电压大小和分区的限定等因素也会影响无功源的最大无功出力。运行结果对合理利用动态无功源无功储备、是否增设无功补偿设备和分区内无功平衡研究具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 程浩忠，吴浩．电力系统无功与电压稳定性

- [M]. 北京：中国电力出版社，2004.
- [2] Bao L, Huang Z, Xu W. Online voltage stability monitoring using var reserves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (4): 1461-1469.
- [3] Capitanescu F, Van Cutsem T. Evaluation of reactive power reserves with respect to contingencies[C]. Proc Bulk Power System Dynamics and Control V. Japan, IREP, 2001: 377-386.
- [4] Song H, Lee B, Kwon S, et al. Reactive reserve-based contingency constrained optimal power flow for enhancement of voltage stability margins [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (4): 1538-1546.
- [5] 吴浩, 郭瑞鹏, 甘德强, 等. 发电机有效无功储备的分析和计算[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (15): 13-17.
- [6] 宫一玉, 吴浩, 宋卓然. 发电机无功储备的定义和评估[J]. 电网技术, 2013, 37 (7): 1903-1908.
- [7] 随慧斌, 赵建国, 李可军, 等. 考虑不均衡区域负荷增长的在线电压稳定评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (3): 57-61.
- [8] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (3): 46-47.
- [9] 潘雄, 余国禹. 基于最优潮流并记及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (12): 86-91.
- [10] B Z, CX G, Y J C. A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 1070-1078.
- [11] 张辉, 叶南海, 陈凯, 等. 改进的粒子群算法在可靠性优化设计中的应用[J]. 机械设计, 2012, 29 (7): 59-63.
- [12] 刘建华. 粒子群算法基本理论及其改进研究[D]. 长沙：中南大学, 2009.
- [13] Krink T, Vesterstroem J S, Riget J. Particle swarm optimization with spatisl particle extension [C]. The IEEE Congress on Evolutionary Computing, Honolulu, Hawaii, USA, 2002: 1474-1479.
- [14] Shi Y, Eberhart R. A Modified partiele swam optimizer[C]. IEEE World Congresson Computational Intelligenee, Anehorage, AK, USA, 1998: 69-73.
- [15] 刘佳, 李丹, 高立群, 等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (31): 22-28.
- [16] 刘明波, 谢敏, 赵维兴. 大电网最有潮流计算[M]. 北京：科学出版社, 2010.
- [17] 宫一玉, 吴浩, 杨克难. 一种基于潮流追踪的电力系统无功控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 32 (9): 29-33.
-
- 作者简介
- 唐茹彬 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网中无功电压优化控制。
- 刘宝柱 (1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。
- 王建宇 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化控制。
- (收稿日期：2015-12-10) EA
(编辑：崔岩)