

基于区域电压距离的无功补偿投入的研究

朱 觅,刘俊勇

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:在无功补偿位置、容量确定的情况下,对电力系统无功补偿的投入进行了研究。首先利用“电气距离”进行分区,运用电压稳定裕度思想,考虑主导节点法的不足,提出了基于区域电压距离指标的无功补偿投入参数模型;然后采用粒子群算法对该模型下系统的这种无功补偿最优投入参数进行了计算,并给出了具体的计算流程。IEEE-30算例结果表明,所提参数有效地改善了系统无功投入的合理性,并相应降低了系统损耗,对系统无功补偿有较好的实用价值。

关键词:无功补偿;投入参数;区域电压距离;粒子群算法;电气距离

Abstract: Putting the reactive power compensation into power system when the position and capacity of reactive power compensation is determined is studied. The "electrical distance" is used to divide the grid firstly and a parameter model based on regional voltage distance is put forward by using voltage stability margin theory. Then, the optimal input of reactive power compensation in this model is calculated by particle swarm optimization (PSO). The results of IEEE-30 numerical example show that the proposed parameters are practicable because they can make reactive power compensation much more rational and reduce the system losses, which provides a better practical value for reactive power compensation in power system.

Key words: reactive power compensation; operational parameter; regional voltage distance; particle swarm optimization (PSO); electrical distance

中图分类号:TM732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)02-0019-05

0 引 言

无功补偿是电力系统安全经济运行的一个重要组成部分。电力系统的安全性和经济性与无功补偿节点的选择和无功补偿的投切密切相关。合理地选择无功补偿点,并对电力系统无功电源进行合理配置,再合理地投入系统运行,能够有效地维持电压水平并提高电力系统运行的稳定性,还可避免无功的远距离传输,从而降低有功网损和无功网损,使电力系统能够安全经济运行。

迄今为止,国内外电压弱节点及其补偿的研究主要集中在无功补偿点的确定^[2-6],而其中系统在运行到何种状态下投入无功补偿仅只是凭借运行人员工作经验,鲜少见有对具体投切方面的研究。文献[2]利用无功裕度的排序确定了无功补偿点;文献[3]在对临界电压和临界功率在静态电压稳定极限作用进行分析,对简单交流电路的电压电流特性进行讨论后,提出了确定电力系统无功补偿点的一种方法;文献[4-6]分别运用协同进化法、遗传禁忌混合算法、

改进的免疫遗传算法确定无功补偿点。

电压质量的提高是无功补偿的显著特征,研究人员提出了多种基于主导节点的电压控制方法^[7-8]。但在实际电网中的电压越限时主导节点无法控制继而引起控制失效的情况要求了主导节点的可控性,这说明主导节点必须在具有无功补偿设备的节点中进行选择。但是,当具有无功补偿设备的节点不能很好地代表整个区域地电压水平时,主导节点法将失去其优势。

鉴于上述原因,在无功补偿点确定的基础上,提出了系统无功补偿最优投入参数模型,建立了区域电压距离来衡量无功补偿投入参数的优劣,并得出了该模型下的最优投入参数方案。最后在IEEE-30节点系统中进行了仿真计算校验。

1 无功补偿投入参数模型

1.1 区域的划分

电力系统中大多数的控制或扰动仅对其发生点附近与其联系紧密的节点的运行有较大影响,而那些

在电气上远离该点的节点所受影响是很微小的,因此,最好的电压无功控制方法是按区域来进行。

电气距离实际就是节点间相互联系的紧密程度,采用某一节点的电压变化幅值 ΔV 对另一节点处无功功率变化 ΔQ 的灵敏度来表示,电气距离大说明电气上相隔较远,相互间影响小;电气距离小说明电气上联系紧密,相互影响大,可以划分在同一个控制分区中。

根据牛顿-拉夫逊潮流算法可以得到下式。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{Q\theta} & J_{Qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 ΔP 和 ΔQ 分别为节点注入有功功率和无功功率的变化; $\Delta\theta$ 和 ΔV 分别为节点电压相角和幅值的变化量。由于有功与电压间属于弱耦合关系,因此,假设 $\Delta P = 0$,得到下式。

$$\Delta V = S\Delta Q \quad (2)$$

式中 $S = [J_{Qv} - J_{Q\theta} - J_{p\theta}^{-1}J_{pv}]^{-1}$,即为电压幅值变化对无功功率变化的灵敏度矩阵。

其元素 S_{ij} 表示节点 j 处的无功功率注入变化一个单位时,节点 i 处的电压幅值的变化量。一般情况下虽然 $S_{ij} \neq S_{ji}$,但它们往往非常接近,所以可用 $(S_{ij} + S_{ji})/2$ 或简单地以 S_{ij} 来衡量节点 i 和 j 之间电气距离的大小。

$$S_{ij} = S_{ji} = \begin{cases} [(S_{ij})_{ij} + (S_{ij})_{ji}]/2 & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

如果电气距离 S_{ij} 大,则节点 i 与节点 j 耦合强度大,联系紧密;如果 S_{ij} 小,则节点 i 与节点 j 耦合强度小,联系弱。

所考虑的是无功补偿容量和地点固定情况下,哪种状态投入无功补偿最优,因此,选取无功补偿节点为中枢点对系统进行分区。

1.2 无功补偿投入参数指标构建

随着负荷的持续增长或网络中有突发故障时,系统中局部或全部母线电压向临界崩溃点逼近,此时对系统进行无功补偿,则电压回升。当无功补偿点确定时,由于不同运行状态下投入无功补偿,节点电压回升到不同数值,对应网络损耗也会不同。因此,在系统运行到何种状态下投入无功补偿则成为了系统电压稳定和经济运行的关键:一方面,在不适当的状态下投入无功补偿,电压可能不能回升到足够稳定的数值,此时的网络损耗也相应较大;另一方面,在不适当的状态下投

入无功补偿,可能会出现无功过补偿现象。若经常出现过补与欠补,则设备常处于设备闲置状态,利用率低,无功补偿效果不理想,浪费投资。

电压是电能质量的重要标志。供给用户的电压与额定电压值的偏移不超过规定的数值,是电力系统运行调整的基本任务之一。各种用电设备是按照额定电压来设计制造的,只有在额定电压下运行才能取得最佳的工作效率。且电压能直观地反应无功补偿需求,因此选择电压作为无功补偿的投入参数,根据其数值来确定具体在何种状态下投入无功补偿。

系统的电压稳定与投入无功补偿后节点恢复到的电压有关,其值越接近额定值,电压允许波动范围越大。为此,定义节点电压距离得

$$\eta_i = \left| \frac{U_i - U_n}{U_B} \right| \quad (4)$$

其中 U_i 为投入无功补偿后恢复到安全范围内的节点电压; U_n 为额定电压; U_B 为系统基准电压。 η_i 量化的是在投入无功补偿后节点电压的恢复水平。它能直观地表征各节点投入无功补偿后电压与额定电压的远近程度。

由前所述,无功功率具有较强的区域解耦特性,因此,需要对无功补偿的区域进行有效界定,定义区域电压距离。

定义区域电压距离得

$$\lambda = \sum_{j=1}^m \eta_j \quad (m = 2, 3, 4) \quad (5)$$

其中 i 为区域内无功补偿点; j 为前述电气分区所得到的在 i 所属区域内的点。

区域电压距离 λ 量化的是在区域内投入无功补偿后与最佳运行点的距离。由于在电压回升的过程中,各节点电压不是同时到达允许范围,因此,在某一时刻,以此刻区域内所有节点电压距离之和作为区域的电压距离,能真实地反应当前区域的运行状态。区域电压距离越小,各节点越接近稳定运行电压,区域电压越稳定;反之,区域电压距离越大,各节点电压离稳定运行电压越远,区域电压趋向不稳定。

2 最优投入参数的计算

2.1 目标函数

由前节所述,合理地选择无功补偿投入参数,不仅可以提高电压稳定性,而且能减少网络损耗。因

此,以区域电压距离最小作为目标函数,即

$$\min \lambda = \sum_{j=1}^m \eta_j \quad (6)$$

2.2 约束条件

等式约束方程为功率平衡方程。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 P_i 、 Q_i 表示节点 i 的注入有功、无功,由于不同的网络状态,有不同的无功补偿投入参数,相应地有不同的有功功率 $P_i(t)$ 和无功功率 $Q_i(t)$; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电导、电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电压相角差; $j \in i$ 表示所有与节点 i 相连的节点。

不等式约束方程如下。

$$\begin{cases} t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \\ U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中 t 为无功补偿投入参数; U 为节点电压状态变量,各变量均在上下限约束中。

2.3 基于粒子群算法的投入参数计算

基于粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 具有全局最优、算法简单、计算快速、易于实现、收敛性高等优点,因此选取此方法对何种状态下投入无功补偿最优这个问题进行求解。

(1) 迭代公式。每个粒子代表一个无功补偿投入系统参数,在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:一个是个体极值 $pbest$,即粒子先前的最佳位置;另一个是全局极值 $gbest$,即所有粒子中最佳粒子的指数。在找到这两个最优解时,粒子根据以下公式来更新自己的速度和新的位置。

$$\begin{cases} V_{ij}^{k+1} = w_k v_{ij}^k + c_1 r_1 (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) \\ \quad + c_2 r_2 (gbest_j^k - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \end{cases} \quad (9)$$

式中,下标 i 代表第 i 个粒子,下标 j 代表速度(或位置)的第 j 维,上标 k 表示迭代代数。 w_k 为上一代速度对于当前速度影响的权重,该值从大到小变化; v_{ij}^k 和 x_{ij}^k 分别表示第 i 个粒子在第 k 次迭代中第 j 维的速度和位置; c_1 和 c_2 是学习因子,通常 c_1 、 $c_2 \in [0, 4]$; r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; $pbest_{ij}^k$ 是第 i 个粒子在第 j 维的个体极值的坐标; $gbest_j^k$ 是群体在第 j 维的全局极值的坐标。

(2) 编码和适应度函数。PSO 算法解决优化问题的过程中有两个重要的步骤:问题解的编码和适应度函数。

无功补偿投入参数 t 采用实数编码,即 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$,其中 t_i 为实数。

粒子群适应度函数一般取目标函数最大值,选取模型中的目标相反数作为适应度函数,即 $\lambda' = -\lambda$ 。

2.4 计算步骤

第1步:根据各无功补偿投入系统的限制条件,对群体中的个体进行随机初始化。在正常运行情况下,让负荷按照一定方式增长,当无功补偿点电压降低到临界点时停止计算,随机抽取负荷增长过程中的节点电压;在突发故障情况下,计算各故障下无功补偿点最低电压,随机抽取无功补偿点由正常运行电压到最低电压中的节点电压。

第2步:根据适应度函数计算群体中每个个体的适应度函数值 x_i 。

第3步:将每个个体的评价价值同 $pbest$ 值进行比较, $pbest$ 值中最好的评价价值表示为 $gbest$ 。

第4步:根据式(6)对每个个体 x_i 的粒子速率和位置进行修改。

第5步:如果每个个体的适应度函数值优先于先前的 $pbest$,则把当前值设为 $pbest$ 。如果优于 $gbest$,则把值设为 $gbest$ 。

第6步:如果迭代次数到达最大值,则进行第7步。否则,从第2步开始。

第7步:产生最新 $gbest$ 的个体,为各无功补偿点的最佳无功补偿投入参数。

3 算例分析

采用 IEEE-30 节点标准系统为例说明所提出方法的有效性。IEEE-30 节点标准系统包括 6 条发电机母线、21 条负荷母线和 43 条支路。在节点 7、19、30 并联电容器进行无功补偿。电容器容量分别取两组不同的值,第一组为 12 Mvar、18 Mvar、12 Mvar,第二组为 18 Mvar、27 Mvar、18 Mvar。在仿真计算中将 IEEE-30 节点系统中的发电机设为 PV 节点。

按所述分区方法将系统划分为 3 个区域,见表 1。

表 1 区域划分结果

区域序号	包含节点
区域 1	1 2 3 4 5 6 7 8 28
区域 2	9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 , 20 21 22 23 24 25 26
区域 3	27 29 30

3.1 情况 1 负荷持续增加

在满足电压稳定条件下,负荷按照一定方式增长时,由参考文献[9]方法得到各负荷节点临界电压如表 2 所示。

表 2 临界情况时节点电压表

负荷节点	电压	负荷节点	电压
3	0.953 45	18	0.876 61
4	0.930 91	19	0.872 54
7	0.910 3	20	0.876 75
10	0.893 21	21	0.861 31
12	0.936 23	23	0.833 64
14	0.907 48	24	0.769 41
15	0.889 71	26	0.500 25
16	0.909 59	29	0.665 93
17	0.891 87	30	0.671 47

运用粒子群算法对何种状态下投入无功补偿最佳进行求解。粒子群大小为 100,学习因子 c_1 和 c_2 取 2,速度影响权重 ω 随迭代次数从 0.9 到 0 变化,最大迭代次数为 150。

按步骤求取 3 个补偿点投入电容器组时的最佳投入参数与最小区域电压距离,再计算出对应的系统网损,并与传统的按照电压低于 95% 时投入无功补偿相比较,第一组容量的电容器的计算结果如表 3 所示。

表 3 无功补偿投入系统方案 1

节 点	传统方案		考虑投入参数方案	
	投入参数 /%	区域电压 距离	投入参数 /%	区域电压 距离
7		0.064	96.4	0.035
19	95	0.219	96.5	0.168
30		0.017	95.7	0.005
网损 /MW		2.475		2.389

表 3 中,投入参数为各节点电压额定值的百分数,即在电压降至这个数值时,投入无功补偿。95% 为设定的传统投入参数,96.4%、96.5%、95.7% 分别为用粒子群算法计算出的无功补偿点 7、19、30 的无功补偿投入参数。区域电压距离和网络损耗则分别是在这些投入参数进行无功补偿后,系统恢复到稳定

时的值。

图 1 为负荷持续增加的情况下,由第一组变容器按照传统方案与考虑投入参数方案进行无功补偿后的各负荷节点电压效果对比图。

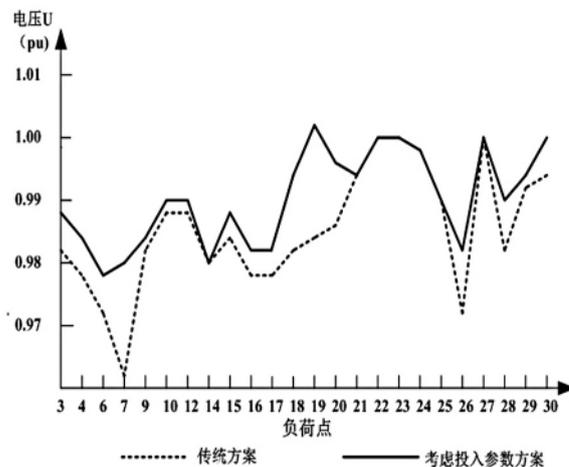


图 1 负荷持续增长时两方案电压效果对比

在负荷持续增加的情况下,由第 2 组较多容量变容器进行补偿的计算结果如表 4 所示。

表 4 无功补偿投入系统方案 2

节 点	传统方案		考虑投入参数方案	
	投入参数 /%	区域电压 距离	投入参数 /%	区域电压 距离
7		0.052	95.9	0.038
19	95	0.182	95.7	0.159
30		0.018	93.7%	0.007
网损 /MW		2.667		2.521

图 2 为负荷持续增加的情况下,由第 2 组变容器按照传统方案与考虑投入参数方案进行无功补偿后的各负荷节点电压效果对比图。

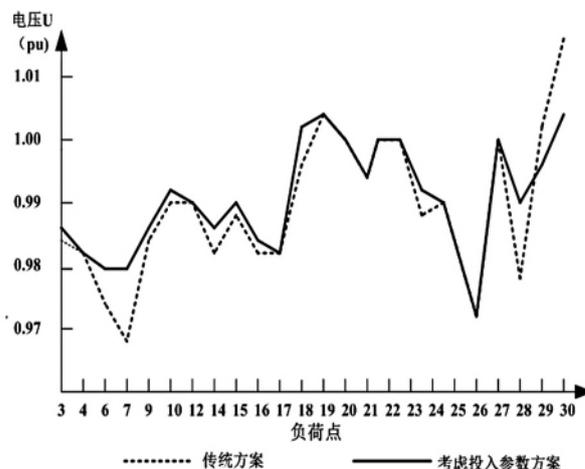


图 2 负荷持续增长时两方案电压效果对比

3.2 情况 2 突发故障

在 $N-1$ 故障情况下,对所选网络进行计算。表 5 列出了 $N-1$ 故障情况下部分故障类型及故障时无功补偿点电压情况。

表 5 突发故障下无功补偿点电压情况

故障类型	电压越线 节点个数	电容器 补偿节点	各补偿点最低电压
发电机 8 退出	2	7	0.96
		19	0.962
		30	0.932
线路 35 退出	8	7	0.948
		19	0.962
		30	0.97
变压器 4 退出	6	7	0.944
		19	0.948
		30	0.97

表 6 为以变压器 4 退出,由第 1 组电容器进行补偿为例,得出的有突发故障时对各无功补偿点进行补偿的最优投入参数结果。

表 6 无功补偿投入系统方案 3

节 点	传统方案		考虑投入参数方案	
	投入参数	区域电压	投入参数	区域电压
	1%	距离	1%	距离
7		0.096	96.3	0.042
19	95	0.225	96.7%	0.173
网损 /MW	3.528		3.176	

其中 95% 为设定的传统无功补偿投入参数 95.8% 和 96.7% 分别为计算出的无功补偿点 7 和 19 在变压器 4 退出时的最优投入参数。区域电压距离和网络损耗则分别是在这些投入参数进行无功补偿后,系统恢复到稳定时的值。

图 3 为变压器 4 退出的情况下,由第 1 组变容器按照传统方案与考虑投入参数方案进行无功补偿后的各负荷节点电压效果对比图。

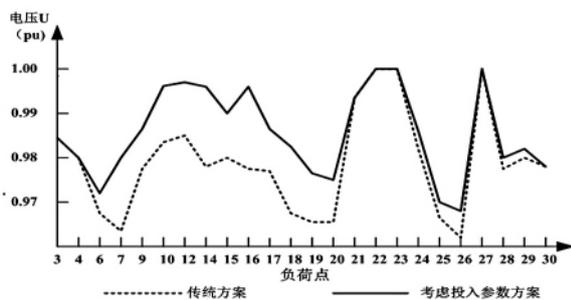


图 3 突发故障时两方案电压效果对比

3.3 与主导节点法相比较

主导节点的可控性要求主导节点必需是具有无功补偿设备的点;而本文所采取的以无功补偿点为中枢纽,通过电气距离的分区方式,说明了本文的无功补偿节点能在一定程度上代表各区域的电压水平,具有主导节点的客观性。因此,仿真算例中,节点 7、19、30 分别为各区域的主导节点。

主导节点法对主导节点电压进行调节控制,将各区域内主导节点电压调节到一个合适的设定值上时,即可保证本区域内所有节点电压均在允许范围内。因此,运用主导节点法进行无功补偿,其目标函数为各主导节点的电压距离最小。

在负荷持续增加的情况下,由第 1 组变容器按照以主导节点电压距离为指标与以区域电压距离为指标进行无功补偿后的最优投入参数结果如表 7 所示。

表 7 无功补偿投入系统方案 4

节 点	主导节点法		区域电压距离法	
	投入参数	主导节点电压 距离	投入参数	区域电压 距离
	1%	距离	1%	距离
7	95.9	0.02	95.9	0.038
19	94.7	0.001	95.7	0.159
30	93.3	0	93.7	0.007
网损 /MW	2.471		2.521	

图 4 为负荷持续增加的情况下,由第 1 组变容器分别按照主导节点法与区域电压距离法进行无功补偿后的各负荷节点电压效果对比图

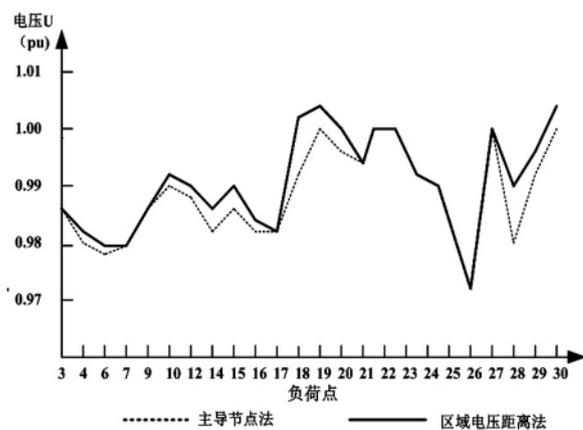


图 4 主导节点法与区域电压距离法电压效果对比

3.4 数据分析

在对仿真模型的最优补偿计算中可以看出,无论是在负荷持续增长的情况下,还是在有突发故障的情况下,按照考虑投入参数的方案投入电容器,其节点 (下转第 77 页)

与电网调度部门进行协商沟通,避免省调 AGC 频繁下发跨越振动区的有功设定值。

参考文献

[1] 王世界. 二滩水电厂发电机变压器组吸收线路无功最大容量计算[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(1): 43-46.

[2] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)(第三版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

(上接第23页)

电压距离远小于按照传统方案进行无功补偿, 相应的网络损耗也有所减小。

由图1、图2、图3可以看出, 在按照传统方案进行无功补偿, 系统各节点电压虽然能回到正常运行范围之内, 但电压偏移较大; 而按照考虑投入参数的方案进行无功补偿, 能使负荷点的电压基本集中在0.98~1.01p.u.之间, 缩小了电压偏移范围, 预留了较多的电压安全校正空间, 有效地提高了电压质量。

对比表3、表4的计算结果可以看出, 对于同一补偿节点, 补偿容量不同, 最佳投入补偿的参数也不同, 最佳投入参数有可能高于95%, 也有可能低于95%。

虽然由表7计算结果得知, 由传统的主导节点法计算得出的有功功率网损较小。但由图4可以看出, 由区域电压距离计算得到的各节点电压的偏移量更小, 系统更加稳定。

结果表明, 虽然各个节点各种情况下最优无功补偿投入参数不相同, 不能得到一个统一固定的值, 但是可以看出, 建立的节点的电压评价指标能判断无功补偿在不同运行状态下不同投入参数进行无功补偿后系统的电压稳定能力, 所提出的方法能在保证电压稳定的基础上, 减少网络损耗。

4 结 论

以上阐述了无功补偿的基本原理, 针对传统的无功补偿未考虑何种状态下投入系统较优的问题, 在电压稳定的思想上建立了区域电压距离指标, 再运用粒子群算法得出确定无功补偿投入参数的具体方案, 方法比较简单实用, 直观方便。虽然不能得出系统关于何种状态下投入无功补偿最佳的统一结论, 但与传统的仅凭运行人员经验相比, 用此方法计算能得到一个

[3] 张健, 孙华东. 二滩电站枯水期调压策略研究[D]. 中国电力科学研究院, 2009.

作者简介:

姜开波(1977), 男, 工程师, 学士, 主要从事水电站运行管理工作;

杨东(1974), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水电站运行工作。

(收稿日期:2012-01-09)

具体值, 保证了系统运行的电压稳定性, 减少了网络损耗, 兼顾了安全性和经济性, 有一定的实际意义和应用价值。

参考文献

[1] CARSON W. TAYLOR. 电力系统电压稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[2] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.

[3] 卢勇, 李盛林, 卢志强. 电力系统无功补偿点的确定及其补偿方法[J]. 电力电容器, 2002(2): 8-11.

[4] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 124-129.

[5] 谭涛亮, 张尧. 基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 57-61.

[6] 王秀云, 邹磊, 张迎新, 等. 基于改进免疫遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 1-5.

[7] 丁晓群, 黄伟, 章文俊. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 44-48.

[8] 龙启峰, 丁晓群, 刘小波, 等. 基于可控主导节点的电压分区及电压校正研究[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 59-62.

[9] 杨琪, 李华强. 基于电压稳定的区域电网无功能力评价[J]. 电力系统保护与控制,

[10] 张聪誉, 陈民铀, 罗辞勇, 等. 基于多目标粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 20(4): 164-169.

[12] 李磊, 黄彦全, 董家读, 等. 基于无功/电压控制的电网优化分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 14(6): 95-99.

作者简介:

朱觅(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压无功;

刘俊勇(1963), 男, 博士, 教授, 主要从事配电网自动化方面的研究。

(收稿日期:2011-12-12)