

动态多目标无功/电压规划的Pareto最优集的求取

张安安^{1,2}, 杨洪耕¹, 杨 坤³

(1. 西南石油大学电子信息学院 成都 610500; 2. 四川大学电气信息学院 成都 610065; 3. 四川省电力公司 成都 610041)

【摘要】动态多目标无功/电压规划问题是一个复杂的多目标非线性优化问题。广泛使用的先评价方法通常只能得到这一问题的单一解,并且在确定各目标间的权重关系时难以给出统一的标准,因而不利于作为实际控制的参考。该文通过创建该问题的多目标数学模型,将动作次数限制归纳为优化目标之一,并应用改进的非支配遗传算法(NSGA-II),实现了动态多目标无功优化问题的Pareto近似最优集的求解。通过IEEE14、30节点电网模型及实际电网模型的计算,验证了该方法的有效性。

关键词 动态无功优化; 多目标优化; 非支配遗传算法; Pareto最优解集

中图分类号 TM71

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.034

Pareto-Based Approach to Multi-Objective Dynamic Volt/VAR Planning

ZHANG An-an^{1,2}, YANG Hong-geng¹, and YANG Kun³

(1. School of Electronic Information Engineering, Southwest Petroleum University Chengdu 610500;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University Chengdu 610061;

3. Sichuan Electrical Power Corporation Chengdu 610041)

Abstract Multi-objective dynamic voltage/reactive power control is a complicated non-linear problem. Conventional pre-evaluated methods can get one solution only. A novel multi-objective dynamic reactive power optimization model is created in this paper and, for solving the model, a relevant improvement has been made in the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). This approach has been applied to the IEEE 14 nodes and 30 nodes systems and an actual system. The result shows that the approach has encouraging performance in dynamic reactive power optimization with objectives of minimizing reactive power loss, voltage deviation, and the number of operations as well.

Key words dynamic reactive power optimization; multi-objective optimization; NSGA II; Pareto optimization set

动态多目标无功/电压规划问题由于考虑了各节点负荷随时间的变化以及离散控制设备动作次数的约束,构成了一个复杂的时空分布非线性优化问题,求解十分困难。文献[1]建立了高中压配电网的动态无功优化模型,并通过离散控制变量和动态负荷的预处理实现了模型的简化和求解;文献[2]提出了非线性混合整数动态无功优化模型,并采用非线性原对偶内点法内嵌罚函数的方法求解了该模型;文献[3-5]运用动态规划法或混合法确定在未来24 h内安装在馈线上的电容器的投切方案或变电站内的电容器和有载调压变压器的控制方案;文献[6]根据预测的24时段负荷数据,将控制设备的动作次数作为约束,通过预测分接头最合适的位置减少搜索空间规模,采用动态规划法求解;文献[7]通过对一天的负荷进行分段,将动态无功优化问题解耦为

几个静态优化问题,并满足动作次数的限制;文献[8]则通过分配控制变量的动作权限,简化数学模型,降低了优化问题的规模,从而实现问题的求解;文献[9-10]则通过引入设备动作成本最小目标函数,求解动态无功优化问题;文献[11]将动态无功优化的非线性原对偶内点法的修正方程进行解耦,提高了原算法的求解规模和速度;文献[12]在开关日动作次数约束基础上,考虑分接头挡位的相邻时段动作次数约束,建立了一种更加实用的动态无功优化模型。以上各方法根据目标函数的特点设计目标分量间的权重关系,将多目标优化问题转化为单目标问题求解,但如何合理地确定权重关系本身就是一个难题;此外,每次计算只得到问题的单一解,不便于决策者根据电网运行实际情况选择适合的控制策略。本文是基于Pareto最优解集的思想,创建动态无功优化的多目标

收稿日期: 2008-12-25; 修回日期: 2009-07-01

基金项目: 四川电网区域无功控制AVC重大项目(川电科技[2008]1号文第6项)

作者简介: 张安安(1977-),男,博士,主要从事多目标无功优化、电压稳定与控制方面的研究。

数学模型, 并通过改进快速分类非受支配遗传算法(NSGA-II)实现问题的求解。本文所用方法为后评价方法, 无需事先确定权重关系, 并能得到问题的Pareto最优解集, 为决策者的灵活控制提供多种选择。

1 多目标动态无功优化模型

1.1 网损目标函数分量

以全天24 h有功网损最小为第一个目标函数分量, 其数学表达式为:

$$f_p = \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(\mathbf{V}_G(t), \mathbf{Q}(t), \mathbf{T}(t)) \quad (1)$$

式中 P_{loss} 表示系统的有功网损; $\mathbf{V}_G(t)$ 、 $\mathbf{Q}(t)$ 和 $\mathbf{T}(t)$ 分别代表 t 时刻的发电机端电压矢量、电容器组无功容量矢量以及分接头档位矢量, 维数分别为 $1 \times N_G$ 、 $1 \times N_C$ 和 $1 \times N_T$, 其中 N_T 、 N_G 、 N_C 分别为变压器支路数、发电机节点数和并联无功补偿装置的节点数。

1.2 电压满意度目标函数分量

模糊隶属度函数为:

$$f_{V_i(t)} = \begin{cases} 0 & V_{L1} \leq V_i(t) \leq V_{U1} \\ 1 - \frac{V_{U0} - V_i(t)}{V_{U0} - V_{U1}} & V_{U1} < V_i(t) \leq V_{U0} \\ 1 - \frac{V_i(t) - V_{L0}}{V_{L1} - V_{L0}} & V_{L0} \leq V_i(t) < V_{L1} \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_i 为第 i 节点的电压幅值; V_{U0} 、 V_{L0} 分别为节点电压的“不能接受”上、下限, V_{U1} 、 V_{L1} 分别为“可以接受”的电压上、下限, 其值的大小直接反映了系统电压偏离期望电压上、下限的程度, 值越大, 则偏离程度越严重。对整个电网, 电压满意度目标函数为:

$$f_v = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N f_{V_i(t)} \right) \quad (3)$$

式中 N 为节点总数。

时刻 t 第 i 点的电压偏离度可用式(2)模糊隶属度函数来衡量, 如图1所示。

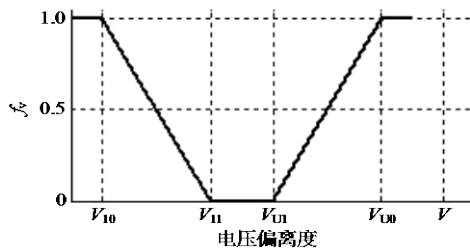


图1 电压偏离度隶属度函数

1.3 动作次数目标函数分量

在实际系统运行中, 无论是为了延长设备使用

寿命, 还是为了减少设备动作对系统的干扰, 都要求一天中变压器档位的调节和电容器组的投切次数尽量少。以全天总的分接头档位变化数和电容器投切次数之和来反映该目标, 分接头每改变一档算一次, 电容器每投/切一组算一次, 有:

$$f_{MO} = \sum_{t=2}^{24} \left(\sum_{m=1}^{N_T} |T_m(t) - T_m(t-1)| + \sum_{l=1}^{N_C} |X_l(t) \oplus X_l(t-1)| \right) + \sum_{m=1}^{N_T} |T_m(24) - T_m(1)| + \sum_{l=1}^{N_C} |X_l(24) \oplus X_l(1)| \quad (4)$$

式中 $T_m(t)$ 是第 m 台有载调压变压器在 t 时刻的分接头档位; $X_l(t)$ 是第 l 台并联电容器在 t 时刻的投/切状态; 符号 \oplus 代表异或运算。

1.4 约束条件

潮流方程约束为:

$$\begin{cases} P_{G_i} = P_{L_i} + V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G_i} = Q_{L_i} + V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $i=1, 2, \dots, N$ 。

变量上、下限约束为:

$$\begin{cases} T_{i_{\min}} \leq T_i \leq T_{i_{\max}} & i=1, 2, \dots, N_T \\ V_{i_0} \leq V_i \leq V_{i_{U0}} & i=1, 2, \dots, N \\ Q_{G_{i_{\min}}} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_{i_{\max}}} & i=1, 2, \dots, N_G \\ Q_{C_{i_{\min}}} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_{i_{\max}}} & i=1, 2, \dots, N_C \\ V_{G_{i_{\min}}} \leq V_{G_i} \leq V_{G_{i_{\max}}} & i=1, 2, \dots, N_G \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_i 、 V_i 、 Q_{G_i} 、 Q_{C_i} 、 V_{G_i} 分别为变压器档位、节点电压幅值、发电机无功输出功率、补偿电容器无功容量以及发电机端电压; 下标带有max和min的量表示对应变量的最大、最小值。

动作次数约束为:

$$\begin{cases} \sum_{t=2}^{24} |T_m(t) - T_m(t-1)| + |T_m(24) - T_m(1)| \leq K_T \\ |T_m(t) - T_m(t-1)| \leq M_T \\ \sum_{t=2}^{24} |X_l(t) \oplus X_l(t-1)| + |X_l(24) \oplus X_l(1)| \leq K_C \end{cases} \quad (7)$$

式中 K_T 为一天之内第 m 台变压器分接头调节次数的最大允许值; M_T 为限制相邻两小时内分接头档位的最大变化; K_C 为一天中第 l 组电容器投切的最大次数。因此, 动态无功优化的目标函数为:

$$\begin{cases} \min(\mathbf{F}) = \min(f_p, f_v, f_{MO})^T \\ \text{s.t. 式(5), 式(6), 式(7)} \end{cases} \quad (8)$$

2 改进NSGA-II算法

文献[14]提出的快速分类非支配遗传算法(NSGA-II), 已经被证明是一种高效的、具有良好分布和鲁棒性的多目标搜索算法, 并且得到了广泛的应用。由于NSGA-II算法本身并不是一种动态优化算法, 因此用于动态优化问题的求解时可做如下改进:

(1) 减少算法在时间上的复杂度, 将全天的无功优化问题看作一个整体, 将时间的动态变化转化为变量的数值变化, 代价是所需计算空间扩大了24倍, 即一天内的发电机端电压、电容器容量及分接头档位的变化构成一个个体, 如图2所示。图中, V_G 、 Q 和 T 分别为维数为 $1 \times N_G$ 、 $1 \times N_C$ 和 $1 \times N_T$ 的矢量。

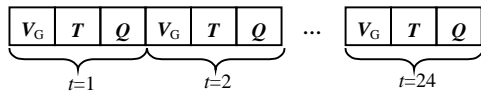


图2 算法个体

(2) 在算法生成初始种群阶段, 内嵌一层静态多目标无功优化算法, 先得到 $t=1$ 时段的Pareto非劣解集, 取其最优排序靠前的 n 个解作为“种子”生成后续23时段的优化个体作为初始值, 避免在整个实数空间中随机生成初始个体。该改进的依据是 $t=1$ 时段个体变量的取值应满足约束条件式(5)和式(6), 而不是任意的; 并且, 根据约束条件式(7), 后续每时段的分接头档位取值取决于上一时段的档位值, 即:

$$T_m(t+1) \in [T_m(t) - M_T, T_m(t) + M_T] \quad (9)$$

$$m=1, 2, \dots, N_T$$

因此, 当 $t=1$ 时段的档位确定之后, 算法初始值的取值范围应由式(9)确定而不是随机取值, 因此算法搜索空间的规模可以简化。本文取 $\text{rank} \leq 3$ 的静态解作为 $t=1$ 时段的“种子”。

(3) 为了保持种群的多样性, 更好地收敛到Pareto最优集前沿, 在计算过程中, 需动态引入新的个体, 并保存原来的精英个体。根据文献[15]的研究成果, 本文算法在每次混合父代种群和子代种群之前, 按10%的比例将 rank 排序靠后的父代种群个体替换为随机产生的新个体(rank 指NSGA-II算法中的非支配域的层次)。

此外, 求解问题也可进行简化: 每次评估个体适应度时, 首先进行动作次数校验, 对不满足式(7)的个体, 直接将其目标函数值置为极大值, 而将其

约束条件值置为负的极小值, 省掉潮流验证和目标函数计算; 其次, 对满足动作次数限制的个体, 分别进行24个时段的潮流验证和目标函数计算, 如果任意一时段的潮流不收敛, 则终止计算, 将其目标函数值置为极大值, 而将其约束条件值置为负的极小值, 在搜索过程中, 这些个体会自动被排序到最后, 而被新的个体替换。图3是算法的流程图。

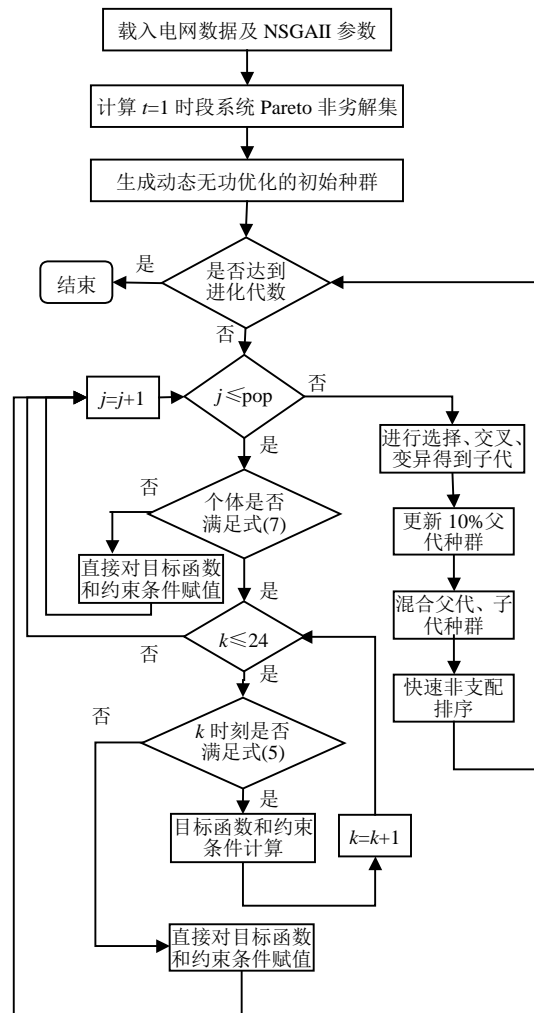


图3 改进NSGA-II算法流程

3 算例分析-IEEE模型

试验系统采用IEEE14、IEEE30节点系统, 所用参数取自文献[16], 基准功率100 MVA。变压器的调档范围为 $0.9+16 \times 0.0125$, 系统电压限值为 $[0.98, 1.07]$, “可以接受”的电压限值为 $[1.00, 1.05]$ 。分接头档位一天最多动作12档, 电容器组最多投切10次, 各节点负荷变化情况如图4所示。算法用C++语言编写。两层NSGA-II算法都迭代100代, 种群数等于10倍控制变量总数, 其余参数按照文献[14]的建议选取。都取动作次数最少的解进行比较, 表1是两种模

型的静态和动态优化结果的比较。

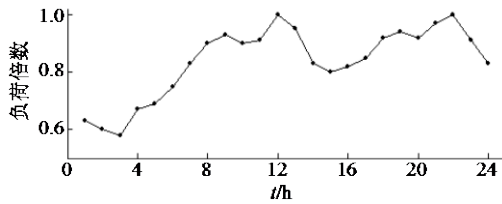
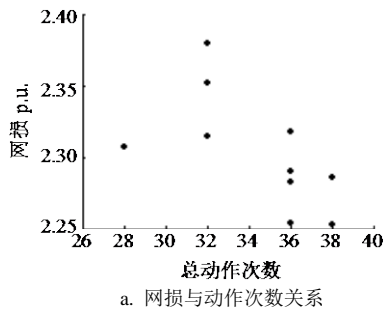


图4 典型日负荷曲线

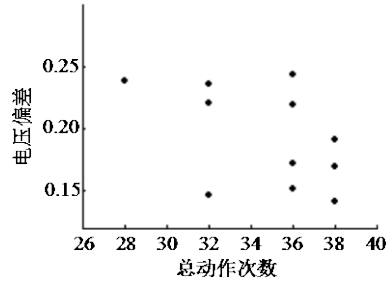
表1 静态、动态优化结果比较

模型	类型	全天网损	电压合格率/(%)	总动作次数	tPB/s	tOri/s.
IEEE14	静态	2.227 3	100	268	64	116
	动态	2.307 1	100	28	93	340
IEEE30	静态	1.018 1	100	390	506	954
	动态	1.089 2	100	52	210	N/A

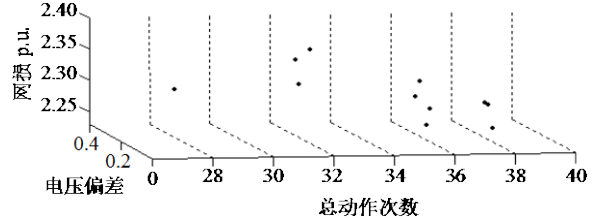
表1中，电压合格率的计算公式为(全天电压越限节点数/(节点数×24))。由表1可见，静态优化的结果，网损和电压合格率都非常理想，但其过多的动作次数，使得该结果根本不可能被用于规划系统的实际运行。而动态优化的结果，在做到尽量最少化动作次数的同时，网损和电压合格率取得了较好的结果，可以用于作为实际操作的参考。表中右边两列是本文方法(tPB)与原NSGAI(tOri)平均计算时间的比较，本文方法在各情况下都快于原方法，对动态30节点模型，原方法已不能完成计算。表1仅仅是Pareto非劣解集的其中之一；图5、图6分别反映了两种模型排序靠前的10次Pareto非劣解的空间分布情况。由图5和图6可以看出，随着总动作次数的增加，网损和电压偏差有减少的趋势。而网损下降较多的点，其电压偏差相对下降较少，这是因为为了降低网损，节点电压通常靠近电压上限运行，因而会增加电压偏差。在实际应用中，运行人员可以根据对优化目标的不同要求灵活选取控制方案。以IEEE30节点模型为例，当希望全天网损最小时，可以选取动作次数56次的解；若要求全天的电压合格率最高，则选动作次数60次的优化解；若希望全天的控制次数尽量少，则选取动作次数52次的解。



a. 网损与动作次数关系

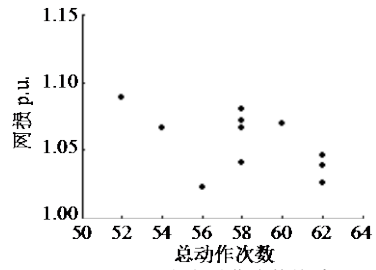


b. 电压偏差与动作次数关系

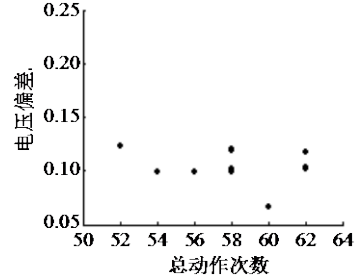


c. 解集在目标空间中的分布

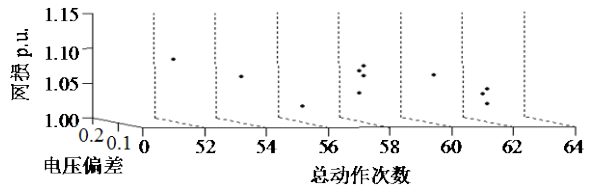
图5 IEEE14模型Pareto解集(前10次解)



a. 网损与动作次数关系



b. 电压偏差与动作次数关系



c. 解集在目标空间中的分布

图6 IEEE30模型Pareto解集(前10次解)

4 算例分析与实际电网

本文所提出的基于Pareto最优集的多目标优化方法(PB)以及另外两种常用的动态无功优化方法——粒子群算法(PSO)及差异进化算法(DE)，分别用来完成图7所示30节点的实际配电系统的动态无功规划。该系统优化前的网损为28.04 MW，10 kV母线电压合格率为97.4%。每种算法分别用不同的初始值进行50次计算，PB算法参数按照文献[14]建议选

取, PSO和DE算法参数按照文献[17]选取。表2列出了最好的3组优化结果的比较, 由表2可见本文所用方法在保证动作次数尽量少的前提下, 电压合格率

都优于PSO和DE算法, 所求得的最优化解个数也远远多于另两种方法。运行人员可以根据实际需要从最优化解集中灵活选取控制方案。

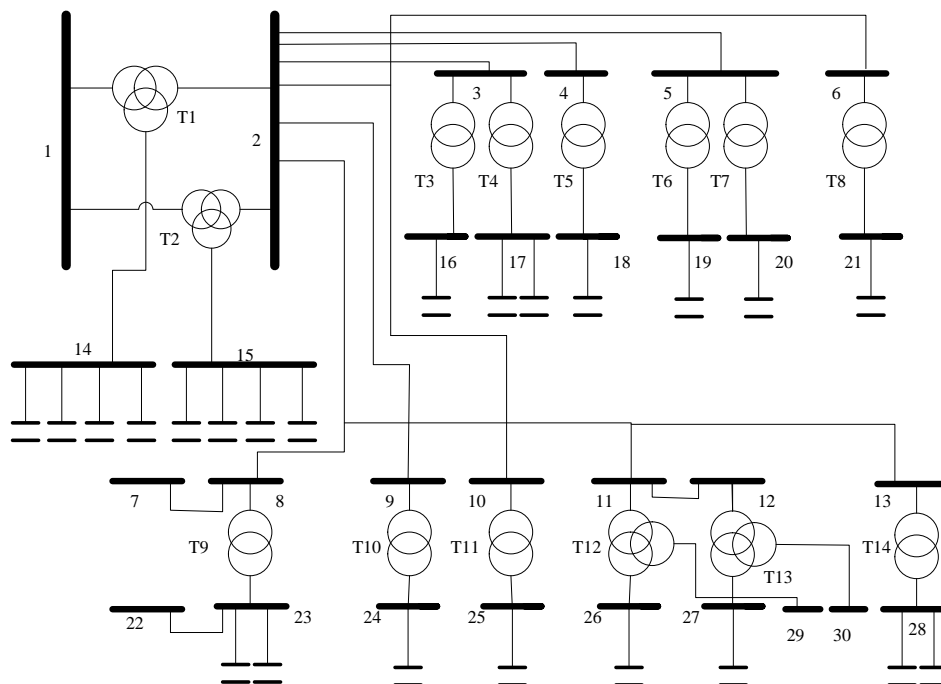


图7 实际电网单线图

表2 实际电网计算结果比较

项目	PSO	DE	PB
1			
全天网损降低率/(%)	15.60	14.98	16.33
10 kV电压合格率/(%)	97.5	97.3	98.2
动作次数	69	54	23
最优化解个数	1	1	10
2			
全天网损降低率/(%)	14.72	13.64	15.01
10 kV电压合格率/(%)	97.9	97.6	98.6
动作次数	68	56	24
最优化解个数	1	1	11
3			
全天网损降低率/(%)	12.64	12.48	14.42
10 kV电压合格率/(%)	98.8	98.6	99.5
动作次数	62	48	22
最优化解个数	1	1	15

5 结论

本文通过改进的NSGA-II算法实现了全天网损最小、电压合格率最高以及控制设备动作次数最少这一多目标动态无功优化问题的Pareto解集的求取。算法的改进, 充分考虑本文模型的特点, 减少了计算负担, 提高了搜索效率。尽管目标函数之间存在相互耦合与制约, 且混合了整数目标函数和实数目标函数复杂的情况, 但算例结果表明本文所采用的方法能求出相应问题的Pareto非支配解集, 为运行人员的实际操作提供了多种选择。

参考文献

- [1] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36. REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems[J]. CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [2] 刘明波, 朱春明, 钱康龄, 等. 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 34-40. LIU Ming-bo, ZHU Chun-ming, QIAN Kang-ling, et al. Dynamic reactive-power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices[J]. CSEE, 2004, 24(3): 34-40.
- [3] LU F C, HSU Y Y. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 681-688.
- [4] HSU Y Y, LU F C. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1265-1271.
- [5] HSU Y Y, LU F C. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 1995, 142(6): 639-645.
- [6] LIANG R H, CHENG C K. Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 625-630.
- [7] HU Z, WANG X, CHEN H, et al. Volt/VAr control in

- distribution systems using a time-interval based approach[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 2003, 150(5): 548-554.
- [8] 蔡昌春, 丁晓群, 王 宽. 动态无功优化的简化方法及实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 43-58.
CAI Chang-chun, DING Xiao-qun, WANG Kuan. Simplified method of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Automation of Electrical Power System, 2008, 32(5): 43-58.
- [9] 周任军, 段献忠, 周 晖. 计及调控成本和次数的配电网无功优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 23-28.
ZHOU Ren-jun, DUAN Xian-zhong, ZHOU Hui. A strategy of reactive power optimization for distribution system considering control action cost and times[J]. CSEE, 2005, 25(1): 23-28.
- [10] NERVES A C, SAVET F J. Voltage and reactive-power control optimization in a distribution system[C]//IEEE Tencon 10 Conference. [S.l.]: IEEE, 2006.
- [11] 赖永生, 刘明波. 电力系统动态无功优化问题的快速解耦算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 32-39.
LAI Yong-sheng, LIU Ming-bo. Fast decomposition algorithm for solution of dynamic reactive power optimization problem in power systems[J]. CSEE, 2008, 28(7): 32-39.
- [12] 颜 伟, 田 甜, 张海兵, 等. 考虑相邻时段投切次数约束的动态无功优化启发式策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 43-58.
YAN Wei, TIAN Tian, ZHANG Hai-bing, et al. Heuristic strategy for dynamic reactive power optimization incorporating action time constraints between adjacent time intervals[J]. Automation of Electrical Power System, 2008, 32(10): 43-58.
- [13] EDMUND K B, GRAHAM K. Search methodologies: introductory tutorials in optimization and decision support techniques[M]. [S.l.]: Springer Science Business Media, LLC, 2006.
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] DEB K, UDAYA B R N, KARRTHIK S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-II[R]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, Springer Berlin, 4403: 803-817.
- [16] CHRISTIE R D. Power systems test case archive[R/OL]. [2008-05-12]. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [17] 潘家和. 地区电网实时电压无功控制方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2008.
PAN Jia-he. Research for real time voltage and reactive power control method in regional distribution network[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.

编辑 漆 蓉

· 我校科研成果介绍 ·

聚合物电极材料及其在电容器中的应用

主要创新点:

- (1) 提出采用导电聚合物聚乙烯二氧噻吩作为片式固体电容器的阴极材料, 在多孔阳极表面沉积聚合物薄膜之前对多孔阳极进行表面活性预处理, 在电容器制备、生产过程中对聚合物薄膜进行在线掺杂;
- (2) 在聚合物阴极电容器制备过程中采用薄膜吸附技术提高电容静电容量引出率;
- (3) 在聚合物电极薄膜制备过程中采用独特的复合氧化剂体系和聚合改良剂;
- (4) 在多孔阳极表面与导电聚合物薄膜之间采用含有纳米硅溶胶的可溶性聚合物进行相容性材料中间隔离;
- (5) 在乙撑二氧噻吩单体材料合成中, 使用比表面积大、催化活性高的复合铜粉为催化剂;
- (6) 发现了在平坦与多孔表面沉积聚合物薄膜的电导率变化规律, 提出并建立了受限空间内导电聚合物薄膜生长机理及模型。

成果水平:

- (1) 所研制生产的聚合物阴极电容器的等效率串联电阻 $\leq 40 \text{ m}\Omega$ 、损耗 $\leq 3\%$ 、漏电流 $\leq 60 \mu\text{A}$ 、容量偏差 $\leq \pm 5\%$, 主要技术经济指标居于国际领先水平;
- (2) 聚乙烯二氧噻吩薄膜电极的电导率为 $10 \sim 100 \text{ S/cm}$, 且环境稳定性好, 乙撑二氧噻吩的产率为 84.6% , 单体及聚合物电极材料的主要技术经济指标达到国际先进水平。