

配电网动态无功优化空间-时间解耦的一种新方法

杨悦, 李国庆

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 离散控制设备动作次数约束造成动态无功优化问题的时空强耦合性, 提出了配电网动态无功优化空间-时间解耦的一种新方法。根据全天各时段静态潮流计算得到的网损值大小, 确定控制设备的预动作时间表, 分配各时段的动作权限, 从而找出第一个具有最大动作权限的时段。然后进行时间表的逐步动态调整, 确定下一动作时段, 直到满足动作控制设备的动作约束条件为止。该方法数学模型清晰简单, 便于实现, 且时刻保证了以网损值最小为依据分配动作时间。优化结果表明能够在完全满足动态次数约束的前提下, 整体优化系统的无功, 达到有效降低系统在一天内的有功损耗的目的。

关键词: 动态无功优化; 静态无功优化; 电容器组; 负荷曲线

A new method for space-time decoupling of distribution network dynamic reactive power optimization

YANG Yue, LI Guo-qing

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The space-time coupling of dynamic reactive power optimization issue is created due to the action constraints of the discrete control equipments. This paper proposes a new method to solve the space-time decoupling of the distribution network dynamic reactive power optimization. The method determines the pre-action time table of the control equipments, distributes the right of action time, and finds the first biggest right action time, according to network power loss calculated by the static flow in different period of a day. Then the time table is gradually adjusted, and the next action time is determined, until the control equipments meet the action constraints. The mathematical model of the method is clear and simple, easy to achieve, and has guaranteed to the basement which is the minimum power loss for distributing operation times. The optimization results show that the network can be optimized on the premise of satisfying the action constraints of the control equipments and achieve the goal that effectively reduces the network power loss of a day.

Key words: dynamic reactive power optimization; static reactive power optimization; capacitor group; load curve

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0039-05

0 引言

不断增长的电力需求以及不断提高的电力市场化程度要求现代电力系统在满足用户需要的前提下, 充分发挥系统的无功调节手段, 保证系统的电能质量和安全经济运行。于是随着无功优化研究的深入, 又提出了动态无功优化的概念^[1]。动态无功优化是指在网络结构参数及未来一天各负荷母线的有功、无功变化曲线及有功电源出力给定的情况下, 通过调节发电机的无功出力、电容器组的出力及有载调压变压器的分接头, 在满足各种运行约束的条件下使整个电网的电能损耗最小。目前, 关于动态无功优化的研究主要是针对单个变电站或配电网进行。也就是说主要通过电容器投切的改变和变压器

分接头的调节来达到无功优化的目的^[2]。

文献[3]根据各负荷母线的负荷曲线的变化, 将负荷曲线分段, 其段数不大于控制设备的日动作次数限制。同时在各个时段中再细分成若干个周期, 每个周期只使用连续变量进行优化。这既保证了动作次数限制, 又简化了约束条件, 但分段的合理性难以保证。文献[4]根据负荷曲线的分段性将负荷曲线分段, 每段的负荷用该段的积分中值代替, 若分段数大于控制变量的日动作次数限制, 则根据一种启发式方法将相邻时段负荷变化最小的两段合成一段, 直至分段数不大于控制变量的日动作次数限制为止。至此, 将动态无功优化转变成了几个静态无功优化问题。这种划分时间段的方法是一种经验方法, 缺乏理论依据。文献[5]进行各时段静态无功优

化, 根据相邻时段的控制设备动作变化设定预动作时间表, 再将时间表进行动态调整。但以控制设备的动作变化为依据, 难以保证能使同时段的网损值降到最小。

1 动态无功优化模型

传统无功优化与动态无功优化由于其概念上的差异, 导致了它们的数学模型也存在着很大的差异。动态无功优化增加了约束条件, 要求变压器分接头调节和电容器组投切开关的动作次数满足调节次数要求^[6]。

动态无功优化的数学模型为

①目标函数是以网损最小为目标

$$\min \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}} f_t(Q_t, T_t) \quad (1)$$

②约束条件

潮流方程约束

$$P_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{\text{cm}} - Q_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

状态变量约束

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (4)$$

控制变量约束

$$T_l^{\min} \leq T_{l,t} \leq T_l^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{\text{cm}}^{\min} \leq Q_{\text{cm},t} \leq Q_{\text{cm}}^{\max} \quad (6)$$

$$Q_{\text{cm},t} = K D_m, K \in N \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{23} |C_{m,t+1} \oplus C_{m,t}| \leq N_C \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{23} |T_{l,t+1} \oplus T_{l,t}| \leq N_T \quad (9)$$

式中: i 为系统节点; m 为安装了电容器组的节点; l 为变压器支路; t 为某时刻; $C_{m,t}$ 为次日第 t 时刻电容器运行状态, 投切开关动作取 1, 否则取 0; \oplus 为异或运算符; N_C 和 N_T 分别表示电容器和有载调压变压器的日最大允许动作次数。约束条件 (8) 和 (9) 为变压器分接头调节和电容器组投切开关的动作约束条件。

2 动态无功优化的时间解耦法

解决目标函数的时空耦合性是求解动态无功优化问题的关键。本文以一天 24 个时段潮流计算得到的网损作为基础, 根据其大小分配控制设备各时段的动作权限, 形成控制设备的预动作时间表。由于在系统的运行过程中, 各控制设备之间、各时段的

动作具有很强的相关性, 根据这种相关性重新调整控制设备的动作时间, 以达到求解出动态无功优化问题的目的。

2.1 负荷的分段

由于负荷曲线是连续变化的, 不能直接应用, 所以进行动态无功优化之前, 必须将负荷曲线进行分段。分段越多, 效果越接近实际曲线, 但优化的计算量越大; 分段太少, 又会造成计算结果不精确。根据以往国内外研究结果^[7-10], 将预测到的未来一天负荷曲线按小时分成 24 个时段, 并采用积分中值定理将每个时段的负荷变成常量, 将负荷曲线变成了负荷阶梯曲线。

2.2 控制设备的预动作表

负荷曲线分段后, 将每个变压器的分接头置于额定电压位置, 各补偿电容器均不投入系统, 对各时段进行潮流计算, 得到各时段的网损值, 根据各时段网损值的大小分配控制设备的动作权限, 确定控制设备的预动作表。由于无功优化的目标函数就是使网损达到最小, 所以利用各时段的网损值来确定控制设备的预动作时间表是最为直观和准确的。这样就将一天 24 时段控制设备应动作的时间排好了次序。

2.3 控制设备动作时间表的动态调整

动态无功优化的动态性体现在根据电网运行过程中控制设备之间的相互关联, 即任一时刻任一控制设备动作会直接或间接影响其他控制设备是否动作以及动作值的变化大小, 因此, 必须重新调整控制设备的动作权限。这里规定第一时段控制设备已经动作, 以其动作后的结果作为初值, 从第二时段开始进行调整。

设控制变量的动作约束为 K 次, 根据预动作时间表, 分成两种情况: (1) 若预动作时间表的最大动作权限时段是在最后的 K 个时段里, 则设定第二大动作权限的时刻为控制设备的第一动作时间, 以此启发式规则找出控制设备的第一动作时段 t ; (2) 若预动作时间表具有最大动作权限的时段不在最后的 K 个时段里, 则设定该时段为第一动作时间。设 t 时段为允许控制设备动作的时段, 以 t 时段优化后的结果作为初始值, 按照变压器分接头为额定档位、电容补偿不加入系统, 计算 $t+1$ 、 $t+2$ 、 \dots 、24 各时段的潮流, 按照计算得出的网损值重新分配 $t+1$ 至 24 时段的控制变量动作时间表。重复动作时间表的调整, 直至调整进行了 K 次。

控制设备动作表的动态调整流程图如图 1 所示。

由于每一时段的无功优化计算会对其后续时段

控制设备的动作权限产生影响, 所以规定第一时段即零至一时刻为控制设备动作时段。这种调整方法时刻保证了以网损值最小为依据分配动作时间, 严格限制了控制设备的动作次数, 在经济上得到了较大的效益。另外本文算法快速, 动态优化只在静态优化基础上增加了很少的一部分计算量, 计算速度得到了改善。

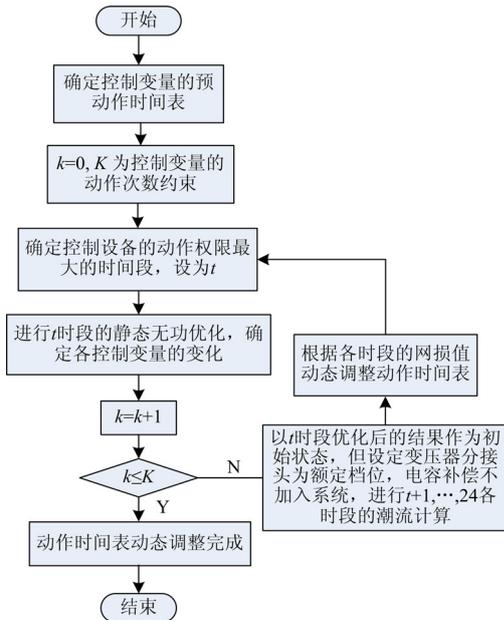


图1 预动作时间表

Fig.1 Pre-action schedule

3 算例仿真研究分析

3.1 仿真的算例模型

本文运用 Matlab 进行仿真计算来检验提出方法的有效性。这里假设各节点预测的负荷曲线相同, 如图 2 所示, 负荷曲线经分段处理后的曲线如图 3 所示。IEEE 30 节点系统参数见文献[11], 结构如图 4 所示。该网络包含 6 台发电机、4 台可调变压器以及 9 个装有容性补偿的负荷节点。PV 节点和平衡节点电压约束设置为 0.9~1.1, PQ 节点电压约束设置为 0.95~1.05; 规定节点 1 为平衡节点; 可调变压器变比范围为 0.9~1.1, 分 17 挡调节; 电容器组动作次数约束 N_c 为 4。其中, 电容器组的数据如表 1 所示。本文采用基于微分进化算法求解各时段的静态无功优化问题。该算法源于遗传算法, 具备了遗传算法的优点, 同时不需要进行编码和解码操作, 在使用上大为简化, 同时它对初始值无要求, 收敛速度快, 对各种非线性函数适应性强, 尤其适应于多变量复杂问题的寻优, 被认为是一种极具潜力的

跨学科优化算法。

预测的负荷数据如图 2 所示。

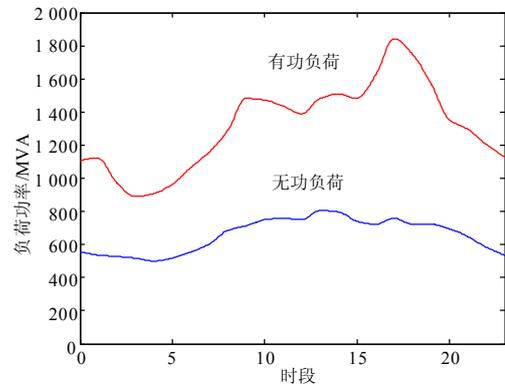
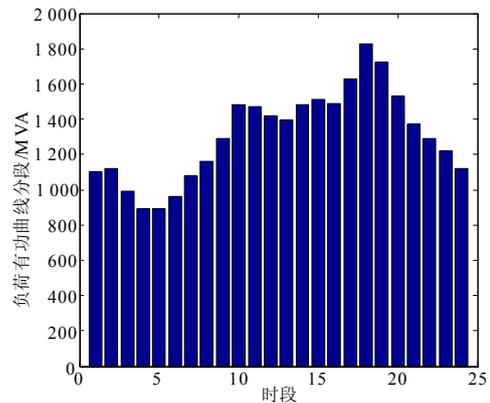
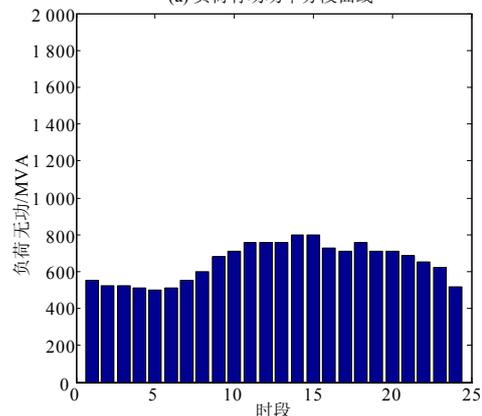


图2 预测负荷曲线

Fig.2 Forecast load curve



(a) 负荷有功功率分段曲线



(b) 负荷无功功率分段曲线

图3 负荷功率分段曲线

Fig.3 Load power sub-curve

3.2 仿真的结果与分析

图 5 对比给出了经静态和动态优化后, 节点 19 的电容器组容量变化情况。从图 5 可以明显看出, 经动态优化后, 有效地减少了电容器组的投切动作次数, 增加了设备的使用寿命。

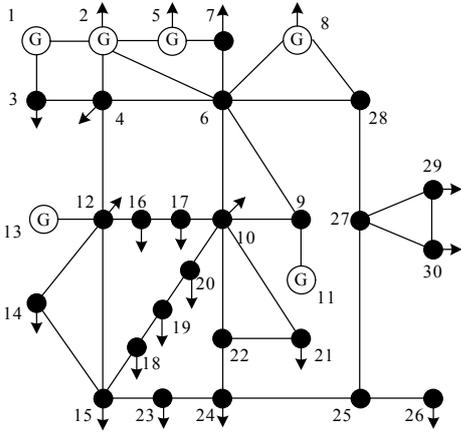


图 4 IEEE-30 节点实验系统结构图

Fig.4 IEEE-30 experimental system structure

表 1 IEEE-30 实验系统的并联无功补偿设备数据
Tab.1 IEEE-30 experimental system parallel reactive compensation equipment data

补偿点	补偿方式	当前补偿容量/MVA	最大补偿量/MVA	最大组数
12	电容器	0	50	10
15	电容器	0	50	10
18	电容器	0	50	10
19	电容器	0	50	10
21	电容器	0	50	10
24	电容器	0	50	10
26	电容器	0	50	10
28	电容器	0	50	10
30	电容器	0	50	10

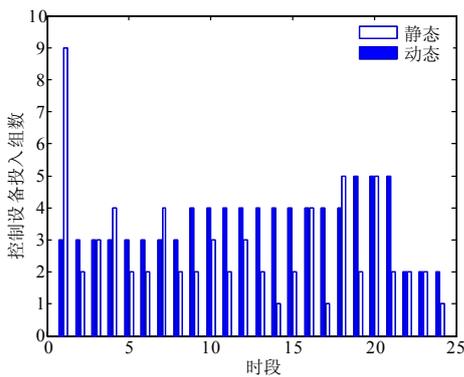


图 5 静态无功优化和动态无功优化节点 19 的控制设备的动作情况

Fig.5 The movement of 19 cases control equipments of static reactive power optimization and dynamic reactive power optimization

表 2 为动作时间的动态调整的结果。电容器组动作时段在第 7、第 8 和第 11 时段动态优化计算时

进行了相应的调整。由表 2 可知：每一时段的动态调整只对后续时段的设备动作权限进行重新分配，在时段 7 优化计算后，将时段 7 优化后的结果作为系统的初始状态，根据动态调整规则进行调整，确定下一动作时段 8，时段 11 类似。在控制设备动作次数严格限制的情况下，根据控制设备随着负荷变化而对电网产生的作用来分配控制设备动作权限，加强了电网的稳定运行，增加了经济效益。同时，有利于提高系统电压/无功的调节能力，从而降低电网的运行风险。

表 2 IEEE-30 实验系统电容器组动态调整结果

Tab.2 The results of the capacitors dynamic adjustment of IEEE-30 experimental system

最大允许操作次数	设备动作的首时刻	投入系统的补偿容量
4	0	150
4	7	230
4	18	310
4	22	100

图 6 为系统静态无功优化和动态无功优化后的对比图。动态无功优化的各时段的能耗下降量有的小于静态优化的结果，这是合乎情理的，但两者相差不多。同时动态无功优化大大减少了控制设备的动作次数，增加了设备的寿命，提高了整体的经济效益。表 3 为在设定控制设备的日动作次数为 4 时，经过动态无功优化和各时段静态无功优化后一天总损耗值的比较，计算时间为动态无功优化时间。

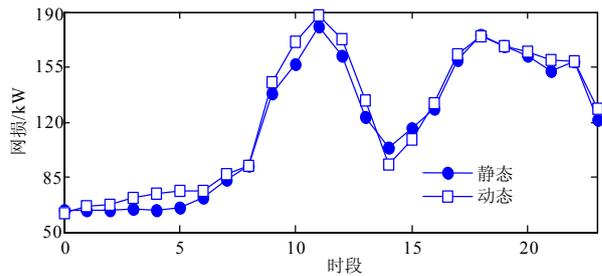


图 6 系统静态和动态无功优化的网损

Fig.6 The losses of static and dynamic reactive power optimization of the system

表 3 动态优化计算结果

Tab.3 The results of dynamic optimization calculation

算例系统	IEEE-30 实验系统
最大允许动作次数	4
一天总损耗值 (动态)	3 523.7 kW
一天总损耗值 (静态)	3 520.1 kW
计算时间	33 min

4 结论

本文提出的动态无功优化方法能够时刻保证以网损值最小为依据分配动作时间, 严格满足控制设备动作次数约束, 解决了动态无功优化问题。总结算例可以得出以下结论:

(1) 本文提出的动态无功优化方法的数学模型简单清晰, 解决问题的思路条理分明, 易于理解, 同时能够严格满足控制变量的动作约束, 最大限度地减小网损, 较好地解决动态无功优化问题。

(2) 该方法将动态无功优化转变成几个静态无功优化, 减小了问题的求解规模, 加速了求解速度。当然, 这样处理得到的结果并不是全局最优解, 而是在计算效率和全局最优二者中取折中, 即在简化模型的基础上求得一个较好的优化结果。

参考文献

- [1] 田甜. 动态无功优化实用模型及启发式混合智能算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
TIAN Tian. The study on practical models of dynamic reactive power and heuristic intelligent algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [2] Grund C E, Breuer G D. AC/DC system dynamic performance-transient stability augmentation with dynamic reactive power compensation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(4): 1493-1500.
- [3] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45-49.
HU Ze-chun, WANG Xi-fan. Sub-period control strategy for optimal reactive power of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 45-49.
- [4] 方兴, 郭志忠. 配电网时变无功电压优化方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 40-44.
FANG Xing, GUO Zhi-zhong. Time-varying optimization for reactive power and voltage of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 40-44.
- [5] 蔡昌春, 丁晓群, 王宽, 等. 动态无功优化的简化方法及实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 43-58.
CAI Chang-chun, DING Xiao-qun, WANG Kuan, et al. Simplified method and implementation of dynamic reactive power optimization[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 1996, 20(5): 43-58.
- [6] 邓佑满, 张伯明, 田甜. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1996, 7(16): 241-244.
DENG You-man, ZHANG Bo-ming, TIAN Tian. Virtual load method and its application for dynamic reactive power optimization of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 7(16): 241-244.
- [7] Liu Yutian, Ma Li, Zhang Jianjun. Reactive power optimization by GA/SA/TS combined algorithms[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9): 765-769.
- [8] Ding Q, Li N, Wang X. Implementation of interior point method based voltage/reactive power optimization[C]. // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore: 2000: 1197-1201.
- [9] Soto J R O, Domellas C R R, Falcao C M. Optimal reactive power dispatch using a hybrid formulation: genetic algorithms and interior point[C]. // IEEE Porto Power Tech Proceedings. Porto (Portugal): 2001: 5-9.
- [10] 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. The study on algorithm of dynamic reactive power optimization of high voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [11] 赵波, 郭创新, 张鹏翔, 等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 1-7.
ZHAO Bo, GUO Chang-xin, ZHANG Peng, et al. Reactive power optimization based on distributed cooperative particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 1-7.

收稿日期: 2010-04-26

作者简介:

杨悦 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化;
E-mail: muzi4876@163.com

李国庆 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化。