

DOI: 10.7667/PSPC150849

## 基于关联矩阵和动态规划法的地区电网无功优化

郑爱霞<sup>1</sup>, 陈星莺<sup>2,3</sup>, 余昆<sup>2,3</sup>, 葛思敏<sup>2</sup>, 罗志坤<sup>4</sup>, 刘潇潇<sup>4</sup>

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210019; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 3. 江苏省配用电与能效工程技术研究中心, 江苏 南京 211100; 4. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 针对目前时段划分中对动作次数的处理和模型简化方面存在的问题, 设计设备状态的关联矩阵, 并据此进行时间区间划分。在此基础上, 对每个时段进行静态无功优化, 保留每个时刻的最优解和部分次优解, 并将这些解作为动态规划的状态变量。在各时段中用动态规划法以动作次数最小为目标寻找最优路径, 从而得到整个调度周期的动态无功优化问题的解。某实际地区电网算例说明了时段划分和基于此的动态无功优化方法的有效性。

**关键词:** 动态无功优化; 地区电网; 动态规划; 设备状态关联矩阵

### Reactive power optimization of district power grid based on associated matrix and dynamic programming method

ZHENG Aixia<sup>1</sup>, CHEN Xingying<sup>2,3</sup>, YU Kun<sup>2,3</sup>, GE Simin<sup>2</sup>, LUO Zhikun<sup>4</sup>, LIU Xiaoxiao<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 210019, China; 2. College of Energy & Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Jiangsu Engineering Research Center for Distribution & Utilization and Energy Efficiency, Nanjing 211100, China; 4. Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of action number handing and model simplification in present time division, the associated matrix on equipment state is designed and the time is divided into several intervals based on this matrix. And then static reactive power of each time interval is optimized, the optimum solution and second best solution of each time interval are reserved. Then these solutions are used as state variables of dynamic programming to search the optimum path which has smallest time of action using dynamic programming in each time interval. At last, the solution of dynamic reactive power problem during whole scheduling period can be gotten. An example of region power system shows the effectiveness of time division and dynamic reactive power optimal method based on it.

**Key words:** dynamic reactive power optimization; district power grid; dynamic programming; associated matrix on equipment state

## 0 引言

地区电网无功优化是通过调节变压器分接开关和无功补偿装置状态来优化电网潮流分布<sup>[1]</sup>, 控制调节的开关设备由于设备制造等原因具有严格的设备动作次数限制, 在实际工作中为了适应负荷的动态变化, 需要计及调节设备的动作次数约束, 这将无功优化问题变成一个复杂的动态优化问题<sup>[2-3]</sup>。目前, 对该问题的处理可以总结为三大

类: (1) 简化动态规划法的求解空间<sup>[4-6]</sup>; (2) 通过分段简化成静态无功优化问题<sup>[7-11]</sup>; (3) 将费用作为目标函数进行简化, 将控制变量的动作次数约束还原为经济成本来处理<sup>[12]</sup>。

上述研究中, 动作次数有两种定义: (1) 控制变量在调度周期内的取值变化次数<sup>[13]</sup>; (2) 对应开关在调度周期内的投切次数<sup>[14]</sup>。采用定义一时可以通过一系列简化措施来保证动作次数约束, 从而简化模型, 比如使控制变量的调节时段数或者负荷曲线的分段数等于设备最大动作次数限制, 认为在每个分段区间上控制设备任意变化都不会违反约束, 将动态无功优化问题转化为几个时段的静态无功优化, 从时间上进行解耦<sup>[15]</sup>。这种方法可能导致控制变量单次调节幅度过大。第二种定义与实际情况相符, 能够保证控制策略的可操作, 但不可避免地增

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(智能变电站能效评测与能效提升关键技术与试点工程建设); 国家发改委物联网专项(基于物联网的智能用电综合管理与能效提升技术研发及产业化)



单一时间断面，每个设备都可能有不同的动作次数，如果简单地以所有设备总动作次数来表征相邻时刻设备的变化状态不合理，因为在地区电网无功优化中控制变量考虑两个，分别是电容器和有载变压器，两者的动作不等价，主要表现在一般情况下电容器分三组，每个电容器日动作不超过 10 次，有载分接开关有 7 档，日调节次数不超过 30 次。因此这里需要对设备动作次数进行“等效”，即标准化。本文设立相邻时刻设备状态变化指标  $M$ ，用于在单个时刻最优状态基础上判断相邻两个时刻是否应该合并。其表示方法为

$$M(t) = \sum_{i=1}^m \frac{D_{i,t}(t)}{\bar{S}_{Ci}} + \sum_{j=1}^l \frac{D_{j,t}(t)}{\bar{S}_{Tj}} \quad (2)$$

式(2)中： $M(t)$  为  $t$  时刻与上一时刻设备状态的变化指标，用于反映此相邻时刻的相似程度； $D_{i,t}(t)$  为从  $t-1$  时刻到  $t$  时刻第  $i$  个电容器的动作次数，取值是动作次数-时间关联矩阵  $D$  中  $D_{i,t}$  元素； $D_{j,t}(t)$  为从  $t-1$  时刻到  $t$  时刻第  $j$  个变压器分接开关的动作次数，取值是动作次数-时间关联矩阵  $D$  中  $D_{j,t}$  元素； $\bar{S}_{Ci}$ 、 $\bar{S}_{Tj}$  分别为一天内电容器组最大的投切次数和变压器分接头的最大允许调整次数。

通过对矩阵  $S, D, M$  的分析，在动作次数满足约束条件下，对一天 24 个时段进行划分。采用本文方法无需事先规定区间个数，而是在时段合并过程中不断比较一天的网损值，如果随着合并的进行，减少的网损费用小于设备的动作代价时，就取消相应的合并，且以此刻的分段数作为最终分段结果，继而进行段内的静态无功优化。据此，设立分段终止判据为

$$\varepsilon = \Delta p \rho_{dq} \Delta t - F \quad (3)$$

式中： $\Delta p \rho_{dq} \Delta t$  为网损节省费用； $F$  为设备动作代价， $F = \rho_{dr} d_{dr} + \rho_{fr} d_{fr}$ ， $\rho_{dq}$  为当前时刻的电价， $\rho_{dr}$  和  $\rho_{fr}$  分别为电容器和分接头的单次调节代价， $d_{dr}$  和  $d_{fr}$  分别为电容器和分接头的动作次数。根据文献 [16] 设定 110 kV 变压器其抽头调节代价为 1.0~2.0 元/次，220 kV 的变压器抽头调节代价为 1.5~2.5 元/次，10 kV 无功补偿装置投切代价为 0.5~1.2 元/次。

### 2.2 时间区间划分步骤

在时间区间的划分过程中，首先要满足每个设备的动作次数限制，然后根据动作次数对近似时刻进行合并，在动作次数满足要求之前并不进行合并结束的判断，只有合并进入动作次数约束区间内后，才根据合并终止判据进行判断是否结束合并，合并时刻确定的顺序则是根据每个时刻总的动作次数来

决定。具体步骤如图 3。

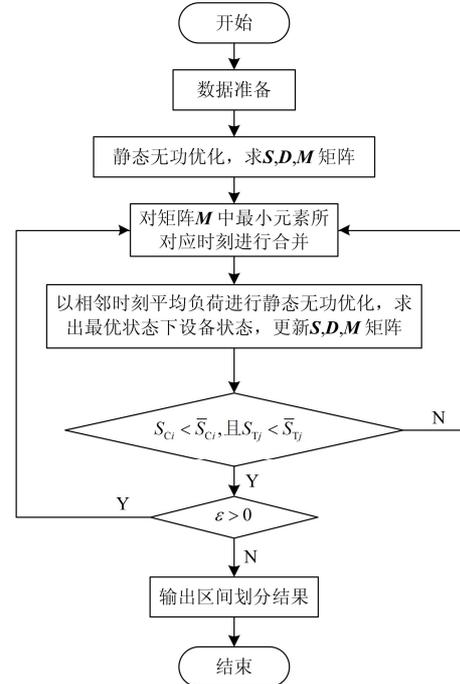


图 3 时间区间划分流程

Fig. 3 Time interval divide progress

(1) 根据母线预测负荷对每个时刻进行以网损最低为目标的静态无功优化，得到每个时刻最优状态下设备的状态，形成设备状态-时间关联矩阵  $S$ 、动作次数-时间关联矩阵  $D$  以及每个时刻的设备状态变化矩阵  $M$ 。

(2) 对设备状态变化矩阵  $M$  内元素进行排序，对取值最小的时刻依次进行合并，以两个时刻的平均负荷进行静态无功优化，求出合并时刻最优状态下的设备状态，并更新矩阵  $S, D, M$ ；

(3) 对  $D$  矩阵每行求和即为当前设备日动作次数  $S_i$ ，判断  $S_i$  与设备最大动作次数  $\bar{S}_{Ci}$ 、 $\bar{S}_{Tj}$  的关系，如果不满足则跳至步骤(2)继续进行合并；如果满足则跳至步骤(4)进行是否终止合并的判断。

(4) 分别统计合并前后一天的网络损耗，并根据动作次数的变化计算设备动作代价，得到终止判断判据  $\varepsilon$ ，如果  $\varepsilon > 0$ ，则继续进行合并，并跳至步骤(2)；如果  $\varepsilon \leq 0$ ，则终止合并。

(5) 整理时段划分区间，输出结果。

### 3 基于动态规划法的设备动作序列优化

考虑到一天的设备动作次数约束，在时间区间划分基础上，选用可投切电容器和有载调压变压器作为控制变量，动态规划过程中的状态量用可投切电容器的组数和有载调压变压器的分接头表示。状态变量可以表示为





表 1 变压器参数

Table 1 Parameters of the transformer

变压器	额定容量/ Mvar	电阻/p.u.	电抗/p.u.	高压侧基准 电压/kV	低压侧基准 电压/kV	高压侧额定 电压/kV	低压侧额定 电压/kV
T1-H	180	0.001 5	0.089 2	220	1	236.5	1
T1-M	180	0.000 7	-0.007	110	1	121	1
T1-L	90	0.001 3	0.055	10	1	11	1
T2	40	0.012	0.262	110	10	115	11
T3	40	0.010 1	0.258	110	10	110	10.5
T4	40	0.010 9	0.254	110	10	115	11
T5	40	0.010 8	0.259	110	10	110	10.5
T6	40	0.010 2	0.265	110	10	110	10.5

表 2 可投切电容器组配置情况

Table 2 Capacitor switching configuration

电容器	C1	C2	C3	C4	C5	C6
可投切组数	4	2	2	1	2	1
每组容量/Mvar	4.008	3	3	4.8	2.016	3.3

表 3 输电线路数据

Table 3 Data of transmission lines

线路	电阻/p.u.	电抗/p.u.	电纳/p.u.	基准电压/kV	最大允许电流/A
L1	0.000 8	0.002 8	0.097 44	220	630
L2	0.001 8	0.004 7	0.009 12	110	639
L3	0.001 3	0.003 3	0.006 38	110	648
L4	0.001	0.002 6	0.005 24	110	639
L5	0.001	0.002 6	0.005 24	110	639

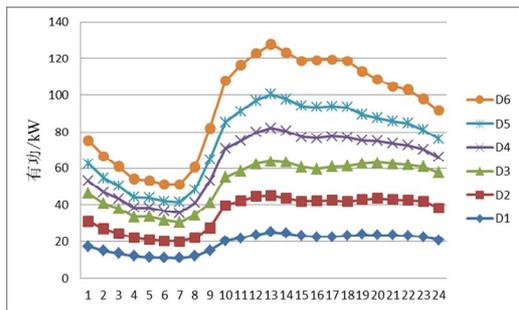


图 6 母线有功负荷预测曲线

Fig. 6 Bus load forecasting curve

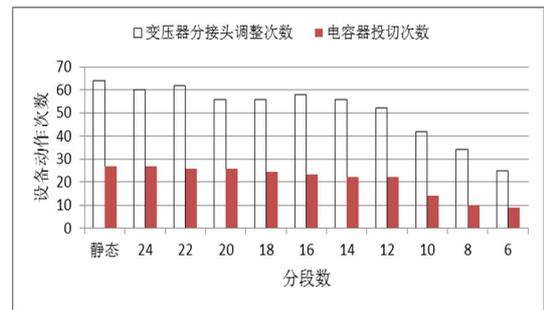


图 8 时段合并过程设备动作次数关系

Fig. 8 Equipment action time relation during time merge

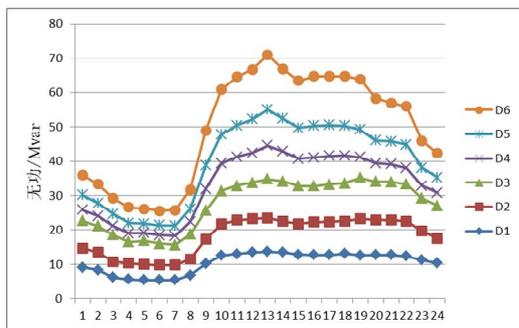


图 7 母线无功负荷预测曲线

Fig. 7 Bus reactive power load prediction curve

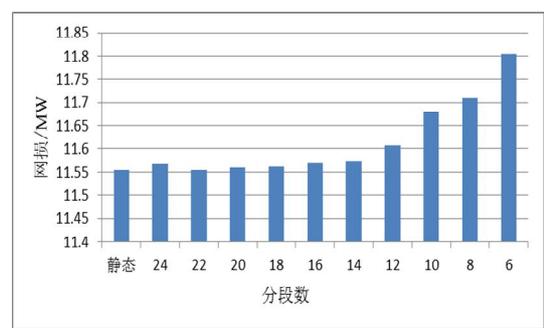


图 9 时段合并过程中网损的变化情况

Fig. 9 Changes of time and the net loss

为了反映变压器分接开关的动作情况, 图 10 给出了单点静态优化和分段数为 8 时的 T1 变压器分接开关调整情况, 同静态优化的结果相比, 分段优化避免了变压器分接头大幅跳跃性动作。同时可以看出, 变压器分接头一次可能调节 2 档(如时刻 1-2), 按照实际情况此刻的动作次数应该记为 2 次。按照最大设备动作次数为分段数的方法不能考虑到这种情况, 如果有一个分段区间变压器分接开关调整 2 档及以上, 并且其他区间都动作, 那么这样的分段就不能满足设备动作次数的限制; 另外一种情况是设备未必会在每个分段区间都动作, 通过设备最大动作次数分段方法实际上减少了可能的分段数, 缩小降损空间。本文在充分了解每个时段设备动作情况下, 进行分段避免这些问题, 最终根据判断在电容器最大动作次数约束为 6 次的情况下, 将一天 24 h 分为 7 段也表明了这一点。

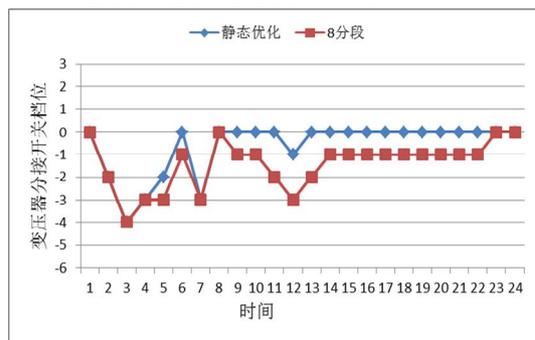


图 10 T1 变压器分接头动作曲线

Fig. 10 T1 transformer tap motion curve

表 4 时间区间划分结果

Table 4 Time interval division result

时段	时刻	有功均值	无功均值
1	1~7	8.16	6.20
2	8	8.49	6.68
3	9~16	16.27	13.09
4	17~21	15.96	12.72
5	22	14.53	11.48
6	23	13.42	10.02
7	24	12.53	9.32

(2) 在动态分段过程中, 最后一次分段时已经求出了每分段的最优设备状态, 但这一状态是基于前分段设备状态已经确定的情况下得出, 由此得到的整个调度周期的最优设备动作时间序列并不一定最优, 整个调度周期的动作次数最优解很可能在包含一系列次优解的序列中。根据本文动态规划法优化设备动作次数的思路求解结果和分段过程中得出的最优状态比较见表 5, 对比分析动态规划算法优化

设备动作次数前后可知, 利用动态规划算法优化控制设备的动作次数之后, 损耗增加了 0.33 MW, 但是一天内主变动作次数减少了 9 次, 电容器动作次数减少了 3 次, 在能耗增幅较小的情况下减少了有载调压分接开关和电容器的总投切次数, 最重要的是结合时间区间的划分情况, 优化了每个设备的动作次数和动作时间, 延长了设备的使用寿命。

表 5 动态规划优化后最优状态情况比较

Table 5 Optimal state comparison after dynamic programming

	变压器分接头 调节次数	电容器动作 次数	网损
分段时的最优 状态	30	16	11.756 9
动态规划后的 最优状态	21	13	12.088 2

## 5 结论

本文主要研究了地区电网动态无功优化的问题, 分为两个主要步骤: 首先对于目前时段划分中存在的不足进行总结, 并且提出了基于关联矩阵反映相邻时刻设备动作情况, 指导整个调度周期内各个时间区间的合并; 其次在时间区间划分的基础上对每个时段进行静态无功优化, 保留每个时刻的最优解和部分次优解, 并将这些解作为动态规划的状态变量, 在各时段中用动态规划法以动作次数最小为目标寻找最优路径。最后通过一个实际地区电网算例说明了本文时段划分和基于此的动态无功优化方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.  
ZHANG Yongjun, REN Zhen, LI Bangfeng. Survey on electric system reactive power optimal scheduling[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56.
- [2] 康忠健, 瞿淑伟. 基于差分进化算法的油田区域配电网无功优化技术的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 226-231.  
KANG Zhongjian, ZI Shuwei. Research on the reactive power optimization of oil-field regional distribution network based on differential evolution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 226-231.
- [3] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.  
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [4] HSU Y, KUO H C. Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming[J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1993, 140(6): 433-438.
- [5] LU F C, HSU Y Y. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 681-688.
- [6] LIU Mingbo, TSO S K, CHENG Ying. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(4): 56-56.
- [7] DENG Y, REN X, ZHAO C, et al. A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1068-1072.
- [8] 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 Xiaojuan, DENG Youman, ZHAO Changcheng, et al. Study on the dynamic distribution network reactive power optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [9] TERRA L D B, SHORT M J. Security-constrained reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 11(2): 109-117.
- [10] ZHAO B, GUO C X, CAO Y J. A multi agent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1070-1078.
- [11] FERDOUS M J, ARAFAT Y, AZAM M A. Flicker level mitigation of weak grid connected wind turbine with DFIG by injecting optimum reactive power using STATCOM[C] // Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013: 1-5.
- [12] KIMURA N, KASHIWAGI S, MORIZANE T, et al. Optimum control of reactive and real power in converter excited induction generator system for wind power generation[C] // Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014: 1-7.
- [13] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.  
ZHANG Yongjun, SU Jiehe, YI Yingqi. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [14] 赵冬梅, 邱辰, 张旭. 地区电网可视化实用无功优化与规划系统的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 123-127.  
ZHAO Dongmei, QIU Chen, ZHANG Xu. Design of visual and practical reactive power optimization and planning system in area network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 123-127.
- [15] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.  
Lǚ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [16] 张勇军, 任震. 电力系统动态无功优化调度的调节代价[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 34-38.  
ZHANG Yongjun, REN Zhen. Readjusting cost of dynamic optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 34-38.
- [17] HU Z, WANG X, CHEN H, et al. Volt/Var control in distribution systems using a time-interval based approach[J]. IET Proceedings — Generation, Transmission, and Distribution, 2003, 150(5): 548-554.
- [18] LIU M B, CANIZARES C A, HUANG W. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 889-899.
- [19] 周鑫, 诸弘安, 马爱军. 基于多种群蚁群算法的多目标动态无功优化[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 231-236.  
ZHOU Xin, ZHU Hongan, MA Aijun. Multi-objective dynamic reactive power optimization based on multi-population ant colony algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 231-236.
- [20] 刁浩然, 杨明, 陈芳, 等. 基于强化学习理论的地区电网无功电压优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 408-414.  
DIAO Haoran, YANG Ming, CHEN Fang, et al. Reactive power and voltage optimization control approach of the regional power grid based on reinforcement learning theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 408-414.

收稿日期: 2015-05-19; 修回日期: 2015-12-08

作者简介:

郑爱霞(1968-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备运维、无功电压、电网节能降损、电能计量等工作; E-mail: alic6808@sohu.com

陈星莺(1964-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制、高效用电与节能、能源管理与能源经济; E-mail: xychen@hhu.edu.cn

余昆(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制。E-mail: kun.yu@vip.sina.com

(编辑 姜新丽)