

电力系统多时段无功优化研究

别朝红, 周婷, 王锡凡

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电力系统的多时段无功优化问题, 在基于统计学原理分时段方法的基础上, 提出了一种基于无功调节设备一天内最大调节次数的启发式迭代分时段算法, 从而可以根据负荷变化的趋势得到无功控制设备动作的时间点. 时间点确定之后, 即可应用单一负荷下的静态无功优化研究成果, 计算得到无功控制设备的调节状态. 该方法可以自适应地修正划分时段的门槛值, 从而保证了分段的结果具有可操作性. IEEE-39 节点算例的分时段无功优化计算从网损、设备动作次数、计算量 3 个方面说明了本文所提出的分时段策略的有效性, 表明了本方法不仅可明显降低网损, 而且可以简化无功优化控制操作.

关键词: 无功优化; 分时段控制; 启发式迭代算法

中图分类号: TM714.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0698-05

Studies on Reactive Power Optimization Based on Transition-Optimised Control Strategy

BIE Zhaohong, ZHOU Ting, WANG Xifan

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A heuristic iterative algorithm for transition-optimised control strategy, which considers the maximum allowable daily switching time of control devices, is presented by statistics analyzing based load profile partitioning algorithm. Essentially it considers voltage and reactive power control as a time-based scheduling problem, with the intention of avoiding unnecessary changes in status and output of reactive control device. The demand profile can be classified adaptively using the proposed heuristic iteration method through evaluating the standard deviation and the range of the sequence of load demand points. Furthermore, an algorithmic transition-optimized model of the voltage/var control is then presented based on demand pattern classification. The solution algorithm and different control strategies are studied in the transition-optimization. From the power loss, switching times of control devices and computation burden, the calculation for IEEE-39 system shows that this method is reasonable and valid. Moreover, case studies illustrate that the integrated algorithmic and heuristic technique for transition-optimised voltage and reactive power control not only effectively reduces power losses but also greatly simplifies control operations.

Keywords: reactive power optimization; transition-optimised control; heuristic iterative algorithm

通过对电力系统的无功进行优化配置和调度, 不仅可以维持电压水平, 提高电力系统运行的稳定

性,而且可以降低有功网损和无功网损,使电力系统能够安全经济运行.电力系统无功优化研究比较成熟的是静态无功优化问题,静态无功优化是针对某一负荷断面进行的,要应用于实际电网的无功优化控制还必须在时间尺度上对无功优化问题进行动态的研究,即必须要开展多时段无功优化的研究.多时段无功优化的研究不仅要考虑负荷的变化趋势,而且要结合无功控制设备一天内的最大动作次数.目前对负荷分时段的研究并不多,一般直接使用一天内24个时间点作为控制设备应该动作的时间点,有的文献提出将调度周期分成几个控制时段,却没有明确给出各时段的划分方法,或者虽然提出了分时段的方法,却没有考虑各个负荷点的负荷变化趋势^[1-5].本文在以上研究的基础上,提出了一种基于无功调节设备一天内的最大调节次数的启发式迭代分时段算法,可根据负荷变化的趋势得到无功控制设备应当动作的时间点.时间点确定之后,即可应用单一负荷下的静态无功优化研究成果,计算得到无功控制设备的调节状态.

1 基于统计学的分时段方法

将负荷曲线上的各个点看成一个负荷序列,应用统计学的原理,对该序列的特征进行分析,从而将日负荷曲线划分成不同的控制时段.

假设 L_i 为某负荷曲线上的一点,其中 $i=1,2,\dots,N$, N 为该日负荷曲线上的点数,通常可取24点或48点.定义 $L_{\max}$ 为该日负荷曲线上的最大负荷.将负荷曲线上的点表示成相对于 $L_{\max}$ 的百分数

$$L_i^* = (L_i / L_{\max}) \times 100\% \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

原来以有名值表示的负荷序列,可表示成以日最大负荷的百分数表示的负荷序列

$$L^* = \{L_i^* : i \in I_N\} \quad I_N = \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (2)$$

利用一般统计学中的定义,负荷序列的极差为

$$R_L = \max(L^*) - \min(L^*) \quad (3)$$

负荷序列的标准差为

$$S_L(N) = ((N(\sum_{i=1}^n L_i^{*2}) - (\sum_{i=1}^n L_i^*)^2) / N^2)^{1/2} \quad (4)$$

极差和标准差这两个指标可以被用来描述负荷曲线的波动变化,从而对控制时段进行划分.基于统计学的分时段划分方法就是以这两项指标为基础,首先根据全天的负荷曲线得到如式(2)所示的时间负荷序列,并给定一个可接受的最大极差 $R_{L\max}$ 和最

大标准差 $S_{L\max}$, 进行负荷时段的划分^[6].

2 划分控制时段的启发式迭代算法

2.1 上节方法的不足

时段划分算法利用了统计学中标准差和极差的概念,充分考虑负荷曲线的波动和各负荷点之间的联系,并且避免了负荷曲线分布极不均匀时带来的误差,但是该方法也有着自身的一些缺点.

(1)可接受最大极差 $R_{L\max}$ 和最大标准差 $S_{L\max}$ 的确定需要依赖于经验.在工程实践中, $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 是很难选择的,如果 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的选取过大,会使划分的标准降低,导致许多负荷变化比较大的点被划分到了同一个时段内,从而使分时段优化失去意义.如果 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 选取过小,就可能导致时段划分过多过细,这样既增加了计算的复杂度,又可能增加设备的动作次数,很不经济.考虑到实际系统的负荷曲线差别很大,所以对 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的选取很难有一个统一的标准,需要依靠调度人员的实际经验.

(2)没有考虑设备的动作次数的限制.在上节的分时段方法中,需要知道 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的值,但在实际的系统中,我们更为关心的是一天内的设备最大动作次数 M_L ,这正是我们对负荷分时段的目的所在.在前面的方法中,并没有考虑到 M_L 的取值,如果从 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的取值来保证 M_L 达到要求,不但在理论上很难达到,在实际中也要靠经验来完成.

2.2 多时段划分的启发式迭代算法及流程

针对基于统计学的分时段划分算法的不足,本文提出了一种启发迭代式的分时段方法.该方法将 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的选取和 M_L 的确定联系在一起考虑,既可以较好地解决 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的取值问题,又可以使分时段的个数满足 M_L ,因此相对于统计学方法来说,是一种较好的改进方案.

本文方法的基本思路是:首先初步确定一组 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的迭代初值,然后用统计分时段方法计算分时段的的结果,将所分时段数加和,得到一天内的设备调节次数 A_L ,再根据 A_L 和 M_L 的比较结果,调整 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$,重复计算直到 $A_L = M_L$,计算结束.迭代过程中利用 M_L 的限制调整 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$,因此我们称之为启发式迭代算法.

该方法中,初步确定一组 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 是很重要的,一组好的初值可以减少迭代次数.本文中定义极差和标准差初值为

$$R_{L(0)} = R_L / M_L; \quad S_{L(0)} = S_L / M_L \quad (5)$$

在迭代计算过程中,如果 A_L 和 M_L 不相等,应当调整 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$

$$R_{L(i+1)} = R_{L(i)} \frac{A_{Li}}{M_L}; \quad S_{L(i+1)} = S_{L(i)} \frac{A_{Li}}{M_L} \quad (6)$$

式中: $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 为第 i 步计算使用的极差和标准差上限值; A_{Li} 为第 i 步计算求得的一天内的设备调节次数。

式(6)的作用是对 $R_{L\max}$ 和 $S_{L\max}$ 的值进行自适应调整,使动作次数达到规定的要求,也可以有效减少迭代计算的次数,这也正是本算法名称中启发式一词的由来。为了更加明确地说明本算法的实现步骤,给出本算法的流程如图1所示。

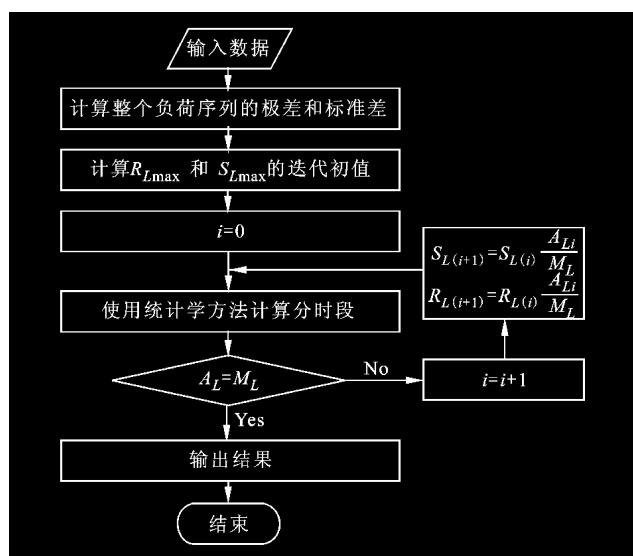


图1 启发式迭代算法的计算流程

2.3 算法特点分析

该算法根据 A_L 和 M_L 之间的联系,采用自适应迭代的方法对 $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 进行动态修正,在保证划分精度的基础上提高计算的效率。算法的特点如下。

(1) $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 的选取可以得到自适应修正。在前节方法中, $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 的选取往往要依靠调度人员的实际经验,没有一个统一的标准,而且需要反复尝试才能得到一组合适的取值。在本节所用的方法中, $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 的取值可以由式(5)和式(6)动态修正,并且 $R_{L(i)}$ 和 $S_{L(i)}$ 的每次修正值都是由 A_L 和 M_L 所决定的,采用了这种自适应的修正方法后,既可以保证 M_L 满足给定的要求,又加快了计算的速度,提高了算法的效率。

(2) 可以满足一天内设备动作次数的要求。在基于统计学的方法中,并没有直接考虑 A_L , 所以为了使 A_L 满足要求必须依靠调度人员的经验和反复的尝试,很难在实际系统中得到应用。在本节所采用的算法中,直接由式(5)、式(6)对 $R_{L(i)}$ 、 $S_{L(i)}$ 取值,考虑

了 M_L 的影响,使之自动满足动作次数的要求。

3 无功优化的模型和算法

在得到对负荷曲线的时段划分结果后,对于每一个无功控制设备应当动作的时间点,我们即可应用单一负荷下的静态无功优化的模型和算法。

目标函数

$$\min f = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (7)$$

式中: n 为节点个数; P_{loss} 为网络的有功损耗; V_i 、 V_j 为节点 i 和 j 的电压; G_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电导; θ_{ij} 为 V_i 和 V_j 之间的相角差。

约束条件包括等式约束和不等式约束。无功优化的等式约束条件即系统的潮流约束方程

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: P_{Gi} 为节点 i 的有功注入量; Q_{Gi} 为节点 i 的无功注入量; P_{Di} 为节点 i 的负荷有功; Q_{Di} 为节点 i 的负荷无功; B_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电纳。

不等式约束条件包括电网运行约束和控制变量的约束,具体表示如下

$$\begin{aligned} P_{Gi,\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}; \quad Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \\ 0 &\leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max}; \quad T_{l,\min} \leq T_l \leq T_{l,\max} \\ V_{i,\min} &\leq V_i \leq V_{i,\max} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: P_{Gi} 、 $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$ 为节点 i 发电机有功出力及其上限、下限; Q_{Gi} 、 $Q_{Gi,\max}$ 、 $Q_{Gi,\min}$ 为节点 i 发电机无功出力及其上限、下限; Q_{Ci} 、 $Q_{Ci,\max}$ 为节点 i 电容器组无功补偿及其上限; T_l 、 $T_{l,\max}$ 、 $T_{l,\min}$ 为第 l 台变压器的档位及其上限、下限; V_i 、 $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 为节点 i 电压幅值及其上限、下限。

以上模型可以采用现有的无功优化算法直接求解,本文采用内点法求解,不再赘述。

4 算例结果与分析

4.1 原始负荷数据

为了说明本文所采用算法的有效性,对 IEEE39 节点系统 24 h 的负荷数据进行分时段计算,然后再进行多时段的无功优化计算。该系统 24 个时刻的负荷曲线分布见图2。

4.2 负荷分时段结果及分析

对图2中所示的负荷曲线,设定 $M_L=7$,应用启

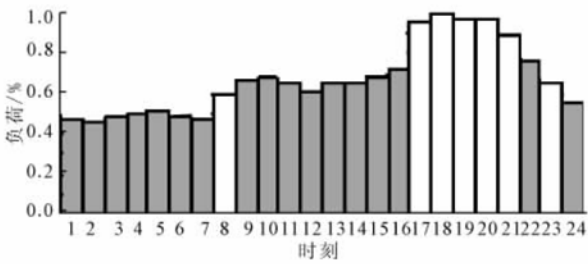


图2 IEEE39节点系统日负荷曲线

发式迭代算法进行分时段计算,所得的负荷分段结果如表1所示.从表1可以看出,在分出的同一个时间段内,负荷序列的极差和标准差都不大,而各时间段之间的极差和标准差都有较大的变化,这说明本文方法的确能够较有效地区分负荷曲线上波动较小的点和波动较大的点,并能从负荷变化较显著的时间点上对时段进行划分.因此,本文方法是一种比较有效的负荷分时段方法.

表1 分时段计算结果

时段	时刻	各段负荷均值 (标么值)	各段标准差	各段极差
1	1~7	0.485 237	0.019 304	0.055 456
2	8	0.591 621		
3	9~16	0.666 968	0.031 705	0.110 400
4	17~21	0.955 114	0.041 857	0.113 334
5	22	0.758 669		
6	23	0.647 053		
7	24	0.560 979		

比较图2、图3,负荷曲线在负荷变动较小的地方被拉平,而在负荷变动较显著的地方其差异却被放大了,这说明本文所采用的方法确实可以缩小不显著的负荷波动,同时还能放大显著的负荷波动,因此可以有效地减少无功优化的计算量,并保证计算的精度.考虑到该算法中采用的都是简单的四则计算,迭代次数通常不会超过20次,因此计算速度非常快.同时,本文算法还将无功调节设备 A_L 的限制引入到统计学算法中,并据此来确定分段的个数,从

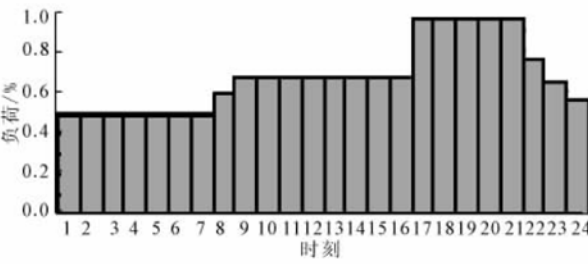


图3 分时段计算后的日负荷曲线

而保证了无功调节设备动作次数的限制.另外,在后续的无功优化中,只需使用该时段的平均负荷来计算即可,这样也起到了简化计算的效果.

4.3 多时段无功优化结果及分析

(1) 网损的比较.表2给出网损的比较结果,首先进行负荷分时段计算,确定第一列的时段划分之后,再在每个时段的开始时刻,用本时段的平均负荷进行无功优化计算,就可得到多时段无功优化的结果.

表2 分时段计算无功优化网损比较

时段	时刻	24 h 全网潮流 计算网损/MW	24 h 每小时无功 优化网损/MW	分时段无功优 化网损/MW
1	1	45.286	39.399	43.758
1	2	46.418	40.402	43.758
1	3	49.265	42.658	43.758
1	4	54.976	47.380	43.758
1	5	56.145	48.256	43.758
1	6	51.483	44.650	43.758
1	7	51.911	45.088	43.758
2	8	52.262	44.636	44.636
3	9	57.647	48.216	47.617
3	10	58.680	48.717	47.617
3	11	54.841	45.847	47.617
3	12	51.799	43.871	47.617
3	13	54.310	45.520	47.617
3	14	55.465	46.418	47.617
3	15	59.377	49.302	47.617
3	16	67.155	54.914	47.617
4	17	153.629	108.224	113.008
4	18	188.160	126.174	113.008
4	19	168.125	118.401	113.008
4	20	166.382	117.152	113.008
4	21	131.556	97.953	113.008
5	22	90.849	72.524	72.524
6	23	67.768	56.259	56.259
7	24	53.485	45.596	45.596
总计		1 886.974	1 477.557	1 471.297

由24 h的网损总计可以看出,分时段无功优化计算网损最小,其次是24 h每小时无功优化网损,24 h全网潮流计算网损最大,可见无论是哪种无功优化都有降低有功网损的效果.分时段无功优化计算网损和24 h每小时无功优化网损相比更小,但这当中存在一定的误差,因为这个网损是用各段平均负荷无功优化计算后求得的,不是根据实际负荷无功优化求得,和负荷曲线的形状有很大关系.由于前面的负荷分时段计算已经将负荷的波动利用极差和标准差两项指标充分进行了考虑,同一个时段内负荷的变化不会很大,因此可以采用平均负荷下的网损代表该时段内每个时刻的网损.

(2) 无功控制设备动作次数的比较.无功控制设

备动作次数的比较参见表3和表4,有载调压变压器的平均动作次数由8.5降到了4.25,补偿电容器的平均动作次数由8.125降到了4.75.由表中的比较可以看出,本文采用的多时段计算大幅降低了无功控制设备动作次数.

表3 有载调压变压器动作次数比较

有载调压变压器	24 h 每小时无功优化计算/次	分时段计算/次
12-11	18	6
12-13	18	6
6-31	0	0
10-32	7	4
25-37	2	2
2-30	17	6
19-33	6	6
20-34	0	2
19-20	5	4
22-35	20	6
23-36	5	5
29-38	4	4
平均动作次数	8.5	4.25

表4 补偿电容器动作次数比较

补偿电容器	24 h 每小时无功优化计算/次	分时段计算/次
C4	7	4
C7	12	5
C8	7	4
C12	5	4
C15	7	5
C20	7	5
C21	6	4
C23	14	7
平均动作次数	8.125	4.75

由于首先进行负荷分时段计算,再在需要的时刻进行无功优化计算,在一个时段内,无功控制设备不进行调整,因此设备的动作次数不会超过时段划分的次数,从而可以简单而有效地将设备的动作次数限定在合理的范围内.虽然动作次数减少了,但是由前面网损比较的分析可知,动作次数的减少对无功优化的结果影响并不大,可见本文的分时段策略是有效的.

(3)计算量的比较.计算量的比较参见表5,表中假设 T 为计算一次无功优化需要的计算量.多时段无功优化包括负荷分时段计算和无功优化计算.负荷分时段计算是简单的四则运算,计算速度非常快,远远不到一次无功优化计算的时间,因此相对于 T 可以忽略不计.无功优化计算的次数由负荷分时段段的个数决定,在本算例中为7次,而24 h每小时无功优化计算要计算24次,因此本文方法明显减少了计算量.

表5 计算量比较表

优化方式	计算内容	计算量	总计
24 h 每小时无功优化	24次无功优化计算	$24T$	$24T$
分时段无功优化	负荷分时段计算	相对于 T 可忽略	$7T$

5 结 论

对于多时段无功优化的问题,在基于统计学原理分时段方法的基础上,本文提出了一种基于控制设备最大动作次数的分时段启发式迭代算法.该方法可以根据设备一天内的最大动作次数自适应地修正分时段段的阈值,从而保证了分时段结果应用于实际控制的可操作性.算例计算说明了本文提出算法的正确性和有效性.

参考文献:

- [1] 苏玲,赵冬梅,韩静.电力系统无功优化算法综述[J].现代电力,2004,21(6):40-45.
SU Ling, ZHAO Dongmei, HAN Jing. Summarization of reactive power optimization algorithm in electric power system [J]. Modern Power System, 2004, 21(6):40-45.
- [2] 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 Zechun, WANG Xifan. Time interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6):45-49.
- [3] 赵娜.基于粒子群类算法的电网无功优化[D].西安:西安交通大学电气工程学院,2006.
- [4] 李正文.电网无功/电压日综合优化控制的研究[D].西安:西安交通大学电气工程学院,2006.
- [5] 李林川,李俊元,武文杰.考虑变压器分接头动作次数限制的综合无功优化[J].中国电力,2005,30(2):49-52.
LI Linchuan, LI Junyuan, WU Wenjie. Synthetic reactive power optimization considering constraints of maximum allowable number of tap changer operations [J]. China Power, 2005, 30(2):49-52.
- [6] BIE Zhaohong, SONG Yonghua, WANG Xifan, et al. Integration of algorithmic and heuristic techniques for transition-optimised voltage and reactive power control [J]. IEE Proceedings: C Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2):205-210.

(编辑 杜秀杰)