

一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究

胡晓阳¹, 王卫平², 王主丁¹, 沈大中³

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 国网四川省电力公司
检修公司, 四川 乐山 600040; 3. 德国MR公司, Regensburg(德国) 93059)

摘要: 针对多时段动态无功优化, 将控制设备动作次数转化成设备调节费用并将其计入目标函数, 建立以全天网损费用与设备调节费用之和最小为目标函数的优化模型。将 Fisher 有序聚类算法引入到负荷曲线分段问题中, 使分段后的负荷曲线尽可能贴近实际负荷水平。提出一种基于改进遗传算法和准动态规划法的两层优化算法, 以获取全天控制设备的动作方案, 实现多时段的协调优化。为兼顾算法的寻优速度和搜索精度, 可依据电网规模灵活设置各阶段保留的最优路径数, 适合于大规模系统的动态无功优化。算例表明了所提方法的实用和有效。

关键词: 动态无功优化; 设备调节费用; 聚类算法; 准动态规划法; 两层优化

A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system

HU Xiaoyang¹, WANG Weiping², WANG Zhuding¹, SHEN Dazhong³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Electric Power Maintenance Company, Leshan 600040, China; 3. Maschinenfabrik Reinhausen, Regensburg 93059, Germany)

Abstract: For multi-period dynamic var control optimization, a dynamic optimization model is used, in which the objective function is the minimum summation of network loss coat and regulating cost of controlling devices. A Fisher ordered clustering algorithm is employed to segment a load curve, making the load curve close to the actual load change. A two-phase optimization method is presented to acquire a multi-period coordinated optimization based on a modified genetic algorithm and a quasi-dynamic programming. In order to take into account both solution speed and accuracy, the number of optimal paths to be recorded for all stages can be set flexibly according to the system size, which is suitable for the dynamic var control optimization of a large-scale system. The results show that the proposed method is practical and effective.

Key words: dynamic var control optimization; regulating cost of controlling devices; clustering algorithm; quasi-dynamic programming; two-phase optimization

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0014-08

0 引言

电力系统无功运行优化是在已有无功补偿设备的基础上, 通过调节并联电容器投入组数和变压器分接头等, 在满足系统运行约束条件的基础上, 降低电能损耗并提高电压合格率。

欧美发达国家调度自动化水平高, 设备的质量好、可靠性高, 一般不会限制控制设备的动作次数。例如欧美国家的变压器大部分都安装了有载调压开关, 年调节次数可达到 1~2 万次, 一般切换 15~30

万次后才进行维护, 在其寿命周期内基本不用更换。而国内电网在设备质量、调度自动化等方面与国外有较大的差距, 且设备在高压的环境下频繁动作也会加速设备的老化, 造成事故隐患, 因此国内对控制设备的动作次数也有着严格的限制。如何考虑控制设备动作次数约束成为动态无功优化的难点。

对于动态无功优化的求解方法, 国内外学者做了大量的研究, 主要有动态规划法^[1-2]、内点法^[3-4]、基于动态无功优化时间解耦的求解方法^[5-6]、人工智能算法^[7-10]和混合算法^[11-12]。文献[1]采用动态规划

法来综合求解变压器分接头、配电站电容器和馈线电容器的控制方案。文献[2]将控制设备的动作次数作为约束, 采用动态规划法求解。但动态规划法在应用于大规模配电网时具有很大的难度, 且求解效率不高。文献[3]用数学表达式描述控制设备的动作次数约束, 并提出完整的非线性混合整数动态无功优化模型, 采用非线性原对偶内点法内嵌罚函数的方法求解, 但罚函数的嵌入条件一定程度上影响了算法的收敛性。文献[4]将改进的预测校正内点法用于无功优化, 提升了计算速度。文献[5]将设备的动作次数限制转化成经济成本, 并与当前时段电能损耗费用一起构成目标函数, 应用灾变遗传算法求解, 效果较好。文献[6]以 24 h 网损为基础形成设备的预动作时间表, 再根据各控制设备、时段间的相关性动态调节。文献[7]结合模糊思想和模拟退火原理对粒子群算法进行改进, 应用与多目标无功优化中, 取得了很好的效果。文献[8]提出一种改进蚁群算法, 采用控制设备延缓动作时间来避免设备的多次动作。文献[9]考虑开关动作次数约束, 采用模拟植物生长算法同时从时间和空间两个角度对目标函数进行整体优化。文献[10]采用结合聚类和竞争克隆机制的多智能体免疫算法求解, 保证了算法的收敛性。文献[11]把离散变量和连续变量分开, 分别采用改进遗传算法和内点法求解。文献[12]用改进粒子群算法求解离散优化子问题, 用预测—校正内点算法求解连续优化子问题。

为降低优化问题的规模, 增强电压无功控制方案的实用性, 可对负荷曲线进行控制时段的划分, 使得各大控制时段段内小时段负荷之间的差异最小, 并尽可能地贴近实际负荷水平。文献[13]对负荷曲线采取经验分段, 难以保证分段的合理性; 文献[14-15]按负荷曲线的单调性进行初步分段, 接着采用融合的思想合并时段使分段数满足控制设备的动作次数约束, 但该方法仍然是一种经验分段, 仅适用于单调性时段内负荷变化较为平缓的负荷曲线, 当单调性内的负荷变化较大时, 此方法不再适用。

本文将设备的动作次数转化成设备调节费用并将其计入目标函数, 建立以全天网损费用与设备总调节费用之和最小为目标函数的动态优化模型; 采用 Fisher 聚类算法对负荷曲线进行分段, 使分段后的负荷曲线尽可能贴近实际负荷水平; 提出一种基于改进遗传算法和准动态规划法的两层优化算法, 兼顾算法的寻优速度和搜索精度, 可依据电网规模灵活设置各阶段保留的最优路径数, 实现多时段无功协调优化。基于典型算例, 分析了在不同负荷水平和不同负荷波动下的控制设备动作效益, 并用本

文方法对多时段无功优化算例进行了计算分析。

1 设备动作效益分析

1.1 控制设备调节费用

设备调节费用主要包括可调变压器分接开关调节装置和并联电容器组开关的成本、维护费用、因无功调度所增加的人工费、控制设备的折旧费和控制设备故障造成的损失费用。

以可调变压器分接开关为例, 其单位调节费用计算公式为

$$B_T = \frac{1}{T_i} (F_{\text{OLTC}} + F_{\text{Fix}} + F_i + F_{\text{Fault}} + F_{\text{Man}}) \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{\text{Fix}} = \frac{f_{\text{Fix}} T_i}{\tau_{\text{Fix}}} \\ F_i = \mu_i f_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_i 为可调变压器分接开关的总调节次数上限值, 万次; F_{OLTC} 为分接开关的单台投资成本, 万元; F_{Fix} 为单台分接开关寿命周期内的总检修费用, 万元; F_i 为仅考虑 OLTC 动作 T_i 次而引起的可调变压器的折旧费; F_{Fault} 为因分接开关故障所带来的总损失费用, 万元; F_{Man} 为因分接开关调整 T_i 次所支付的人工费, 万元; f_i 为单台变压器的成本, 万元; μ_i 为分接开关调节 T_i 次后可调变压器的折旧费系数; τ_{Fix} 为分接开关的检修间隔, 万次, (国产开关的平均检修间隔约为 0.7~2 万次); f_{Fix} 为分接开关每次大修的费用。

1.2 动作效益分析

设备调节带来的网损下降收益减去设备调节费用即为控制设备的动作净收益, 其计算公式为

$$F_{\text{benefit}} = \beta t (\Delta P_1 - \Delta P^*) - B \Delta D \quad (3)$$

式中: F_{benefit} 为设备动作净效益, 元; ΔP^* 为控制设备动作后的网损, kW; ΔP_1 为控制设备动作前的网损; ΔD 为设备调节次数, 本文取动作次数为设备开关在整个调度周期内的调节次数, 即每调节一档视为动作一次; 各无功补偿点电容器组的动作次数即为其投切组数变化量, 投切 n 组则认为动作 n 次; β 为电能单价, 元/kWh; t 为持续时间(本文算例研究周期为 1 h), B 为控制设备的单位调节费用(以 OLTC 为例, 可设置为 2 元/档)。

以 IEEE33 节点系统为例, 分析在不同负荷水平和不同负荷波动下的设备动作效益。系统配变及馈线并联电容器组参数如表 1 所示。

表 1 系统配变及馈线并联电容器组参数
Table 1 Parameters of distribution transformers and shunt capacitors

10 kV 配变		10 kV 并联电容器组	
安装节点	安装容量/kVA	安装节点	无功容量/kvar
2~3	2×315	17	4×300
10~17	8×315	25	4×300
19~32	14×315		

(1) 大、小负荷水平下系统主变 OLTC 的动作净收益比较研究

保持电容器补偿组数不变, 仅调节主变 OLTC 档位的动作效益。大负荷(0.6P~0.8P, P=7 500 kW)和小负荷(0.1P~0.3P)两种负荷水平下 OLTC 的动作净收益如表 2 和表 3 所示。

表 2 大负荷水平下主变 OLTC 的动作净收益
Table 2 Net benefit of adjusting OLTC of the main transformer at high-load levels

P_{power}	调节前			调节后			$F_{benefit}$
	T_{OLTC}	P_{loss}	$V_{qualified}$	T_{OLTC}	P_{loss}	$V_{qualified}$	
0.6P	-5	529.7	63.6	-6.25	515.8	81.8	6.3
0.6P	-3.75	544.8	54.5	-6.25	515.8	81.8	13.4
0.6P	-2.5	561.4	48.5	-6.25	515.8	81.8	21.4
0.7P	-5	753.2	54.5	-6.25	723.9	54.5	15.6
0.7P	-3.75	785.4	42.4	-6.25	723.9	54.5	32.9
0.7P	-2.5	820.8	36.4	-6.25	723.9	54.5	52.1
0.8P	-5	1 103	36.4	-6.25	1 042	48.5	34.6
0.8P	-3.75	1 173	36.4	-6.25	1 042	48.5	74.6
0.8P	-2.5	1 254	36.4	-6.25	1 042	48.5	121.2

表 3 小负荷水平下主变 OLTC 的动作净收益
Table 3 Net benefit of adjusting OLTC of the main transformer at low-load levels

P_{power}	调节前			调节后			$F_{benefit}$
	T_{OLTC}	P_{loss}	$V_{qualified}$	T_{OLTC}	P_{loss}	$V_{qualified}$	
0.1P	3.75	66.7	100	5	65.6	100	-1.3
0.1P	-1.25	72	100	5	65.6	100	-6.2
0.1P	-2.5	73.4	100	5	65.6	100	-7.3
0.2P	2.5	101.3	81.8	1.25	101.3	100	-2
0.2P	0	101.5	100	1.25	101.3	100	-1.9
0.2P	-2.5	102.1	100	1.25	101.3	100	-5.5
0.3P	-2.5	162.7	100	-3.75	160.9	100	-0.9
0.3P	-1.25	164.7	87.9	-3.75	160.9	100	-1.7
0.3P	0	166.8	78.8	-3.75	160.9	100	-2.5

结合表 2 和表 3 可以看出, 对于测试系统:

1) 在研究周期内, 当负荷水平较小时, 主变 OLTC 动作(调节一档或多档)所带来的降损效益低于设备调节费用, 此时动作净收益为负值。因此,

在控制设备不作调节系统电压仍满足要求的情况下, 一般不鼓励设备动作, 减少因追求降损效益最大而导致控制设备动作次数的增加; 在控制设备不作调节可能导致电压合格率偏低的情况时, 可适当调节主变 OLTC 的档位, 以较小的经济代价使电压质量得到改善。

2) 当负荷水平较大时, 主变 OLTC 动作(调节一档或多档)所带来的降损效益高于设备调节费用, 此时动作净收益为正值, 电压质量也得到了进一步的改善。这种情况下, 不宜对控制设备的动作次数加以限制。

此外, 上述结果是基于单条馈线所得。经验证, 当系统有多条馈线时, 调节主变 OLTC 带来的降损效益更好, 动作净效益更高, 此时不宜对设备动作次数加以限制。当负荷水平较小, 动作效益为负值时, 可结合系统电压来考虑设备是否需要动作。

(2) 相邻时段负荷波动大小对主变 OLTC 动作净收益的影响

负荷波动较小时, 主变 OLTC 动作所带来的净效益可正可负, 此时主变 OLTC 是否动作可结合系统电压来综合考虑, 这在表 2 和表 3 已有所体现。此处主要分析负荷变化较为剧烈时, 主变 OLTC 的动作净收益。以下是两种负荷波动场景(大负荷降至小负荷、小负荷升至大负荷)的主变 OLTC 动作净收益分析, 结果如表 4 所示。

表 4 两种负荷波动场景主变 OLTC 的动作净收益
Table 4 Net benefit of adjusting OLTC of the main transformer in two load-fluctuation scenarios

类别	$T_{OLTC}/\%$	P_{loss}/kW	$F_{benefit}/元$	$V_{qualified}/\%$	
大负荷降	当前档位	-6.25	367.5	--	0
	上调 2 档	-3.75	346.8	8.4	70
	上调 6 档	1.25	310.2	22.4	94
	上调 7 档	2.5	302	25.3	100
	上调 9 档	5	286.3	30.7	100
小负荷升	当前档位	0	409.2	--	36
	下调 1 档	-1.25	397.6	5	48
	下调 2 档	-2.5	386.7	9.5	55
	下调 3 档	-3.75	376.4	13.7	67
	下调 4 档	-5	366.8	17.4	82
	下调 5 档	-6.25	357.8	20.8	100

从表 4 可知, 在负荷波动较为剧烈的时段, 调节主变 OLTC 带来的降损效益要高于调节费用, 且调节幅度越大, 动作净收益越大, 因此, 负荷波动剧烈时更不应该限制设备的动作, 在满足电压条件下, 合理调节设备动作以获取更好的经济效益。

2 计及设备调节费用的数学模型

2.1 目标函数

以全天网损费用与设备总调节费用之和最小为目标函数建立优化模型为

$$\min F = \sum_{s=1}^Z (\beta \tau_{s+1} \Delta P_{s+1} + B_T \sum_{l=1}^{n_T} \Delta D_{Tl} + B_C \sum_{k=1}^{n_C} \Delta D_{Ck}) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta D_{Tl} \\ \Delta D_{Ck} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |T_{l,s+1} - T_{l,s}| \\ |C_{k,s+1} - C_{k,s}| \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: Z 为负荷曲线的控制时段数; τ_{s+1} 为第 $s+1$ 个控制时段的持续时间(h); ΔP_{s+1} 为第 $s+1$ 个控制时段优化后的网损, kW; B_T 、 B_C 分别为变压器分接开关、并联电容器投切开关的单位调节费用, 元/次; n_T 、 n_C 分别为变压器分接开关和并联电容器组的数目; ΔD_{Tl} 、 ΔD_{Ck} 分别为相邻时段第 l 台可调变压器分接开关的动作次数(次或档)、节点 k 处并联电容器组投切组数的变化量(次或组)。

2.2 约束条件

约束条件包括功率平衡等式约束、有载调压分接开关档位和并联电容器组投切组数等调压设备控制量的不等式约束及节点电压约束。

$$P_{Gi} - P_{Di} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$\begin{cases} Q_{k,C}^{\min} \leq Q_{k,C} \leq Q_{k,C}^{\max} \\ Q_{k,G}^{\min} \leq Q_{k,G} \leq Q_{k,G}^{\max} \\ T_l^{\min} \leq T_l \leq T_l^{\max} \\ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ S_b \leq S_b^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_{k,C}$ 为某时段节点 k 处并联电容器组无功补偿容量; $Q_{k,C}^{\max}$ 、 $Q_{k,C}^{\min}$ 为该并联电容器组无功补偿容量的上/下限; $Q_{k,G}^{\max}$ 、 $Q_{k,G}^{\min}$ 为分布式电源的无功出力 $Q_{k,G}$ 的上/下限; T_l 为某时段第 l 台有载调压变压器分接开关档位; T_l^{\max} 、 T_l^{\min} 为分接开关档位上/下限; V_i 为某时段节点 i 电压幅值; V_i^{\max} 、 V_i^{\min} 为节点电压上/下限约束; S_b 、 S_b^{\max} 分别为流过支路 b 的实际功率及其最大容许值。

3 基于 Fisher 有序聚类法的控制时段划分算法

Fisher 有序聚类算法的基本思路是定义类的直径, 寻找使样品分成 k 类的最佳划分点, 使得类内

的离差平方和最小的最优分类^[16-17]。

在次日负荷预测曲线已知的条件下, 本文依据负荷曲线的变化趋势, 先确定分段数, 再采用 Fisher 聚类法进行合理分段, 分段后各大控制时段的负荷取为该大段内各小时段的算术平均值。具体步骤如下。

1) 确定分段数

根据负荷变化趋势和设备操作的复杂程度确定合理的负荷曲线分段数 Z 。

2) 计算 k 分段数下所有可能分段方案的直径(离差平方和), $D(i)$ 越小大时段内的相邻小段差异就越小。

$$D(i) = \sum_{t=1}^{t_i} (P_i(t) - \bar{P}_i)^2 \quad (8)$$

$$\bar{P}_i = \frac{1}{t_i} \sum_{t=1}^{t_i} P_i(t) \quad (9)$$

式中: $1 \leq i \leq k$; $P_i(t)$ 为第 i 大时段内第 t 小时段的有功功率; \bar{P}_i 为第 i 大时段内各小时段有功负荷的算术平均值。

3) 计算 k 分段数时的目标函数, 即直径总和最小。

$$E(24, k) = \min \sum_{i=1}^k D(i) \quad (10)$$

4) 确定 k 分段数时的最佳时段划分点。

5) $k=k+1$, 若 $k < Z$, 则跳至第 2) 步; 否则输出各大时段的有功算术平均值和时段划分点。

4 配网动态无功两层优化方法

系统 24 h 内 OLTC 和并联电容器组的运行方式由所有 OLTC 的档位和并联电容器投切开关的开/闭组合形成, 这是一个大规模的非线性问题, 单纯运用动态规划法求解效率不高。本文提出基于改进遗传算法和准动态规划法的动态两层优化法。其中, 第一层优化采用文献[18]提出的静态优化改进遗传算法, 获得各控制时段的若干组优化解, 构成第二层寻优的状态空间; 第二层优化采用准动态规划法, 在整个调度周期内, 从第一层优化获得的状态空间中找出使累计目标函数值最小或近似最小的若干条状态转移路径, 以此形成全天控制设备优化调节策略的备选方案。

4.1 第一层优化

第一层优化采用文献[18]提出的改进遗传算法进行单时段的静态优化, 构建考虑基于补偿降损效益和节点电压约束的节点无功补偿动态区间, 缩小遗传算法的搜索空间, 用于产生初始种群, 提高了

算法效率。分别对 Z 个控制时段进行无功优化，每一个控制时段保留 m 组优化解，依此构成第二层优化的寻优空间。第一层静态优化的目标函数为当前时段的运行总费用最小，公式为

$$\min f_{s+1} = \beta\tau_{s+1}\Delta P_{s+1} + B_T \sum_{l=1}^{n_T} \Delta D_{Tl} + B_C \sum_{k=1}^{n_C} \Delta D_{Ck} \quad (11)$$

具体步骤如下。

1) 对第 S 个控制时段进行单时段的静态优化，保留 m 组最优或较优的解，构成状态空间 $\{X_s\} = (X_{s1}, X_{s2}, \dots, X_{sm})$ ；

2) 以第 S 个控制时段的最优解为初值，对第 $S+1$ 个控制时段进行优化，同样保留 m 组该控制时段的最优或较优的解，构成状态空间 $\{X_{s+1}\} = (X_{s+1,1}, X_{s+1,2}, \dots, X_{s+1,m})$ ；

3) 依照上述方法对调度周期内所有控制时段逐一进行求解，由此产生 Z 组状态空间，最终构成第二层准动态规划寻优的状态空间 $[\{X_1\}, \{X_2\}, \dots, \{X_s\}, \{X_{s+1}\}, \{X_z\}]$ 。

4.2 第二层优化

第二层优化采用准动态规划法，在整个调度周期内，从第一层优化获得的状态空间中找出使累计目标函数值最小或近似最小的若干条状态转移路径，以此形成全天控制设备优化调节策略的备选方案。

在寻优的每一时段，仅保留 n 条使累计目标函数值最小或较小的转移路径，依次对每个时段进行计算，直至第 Z 个时段。在第 Z 个时段内找出使累计目标函数值最小的控制设备状态，再根据已经计算出的各时段的最优状态转移关系向前面的时段逆推，可得到最优转移路径下各时段设备的运行状态。准动态规划寻优的累计目标函数值公式为

$$F(X_{s,i}) = [F(X_{s-1,j}) + \beta\tau_s \Delta P(X_{s,i}) + f_B(X_{s-1,j}, X_{s,i})] \quad (12)$$

$$f_B(X_{s-1,j}, X_{s,i}) = B_T \sum_{l=1}^{n_T} |T_{l,s}^i - T_{l,s-1}^j| + B_C \sum_{k=1}^{n_C} |C_{k,s}^i - C_{k,s-1}^j| \quad (13)$$

式中： $X_{s-1,j} \in \{X_{s-1}\}$ ， $X_{s,i} \in \{X_s\}$ ； $F(X_{s,i})$ 为控制设备到达状态 $X_{s,i}$ 时的累计目标函数值； $\Delta P(X_{s,i})$ 为第 s 时段 $X_{s,i}$ 状态下的网损； $f_B(X_{s-1,j}, X_{s,i})$ 为从第 $s-1$ 时段状态 $X_{s-1,j}$ 到达第 s 时段状态 $X_{s,i}$ 控制

设备的调节费用； $T_{l,s-1}^j$ 、 $T_{l,s}^i$ 分别对应状态 $X_{s-1,j}$ 、 $X_{s,i}$ 下第 l 台 OLTC 的档位； $C_{l,s-1}^j$ 、 $C_{l,s}^i$ 分别对应状态 $X_{s-1,j}$ 、 $X_{s,i}$ 下第 k 处无功补偿点电容器组的投入组数。

准动态规划法寻优状态转移路径如图 1 所示。

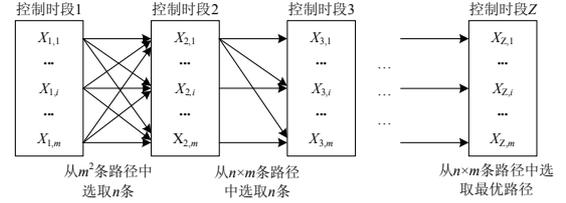


图 1 准动态规划法寻优路径

Fig. 1 Searching paths of the quasi-dynamic programming

4.3 算法总流程

需要说明的是，优化方法中的 m 和 n ，可根据配网的规模和计算效率要求，进行灵活设置。动态无功两层优化方法总流程见图 2。

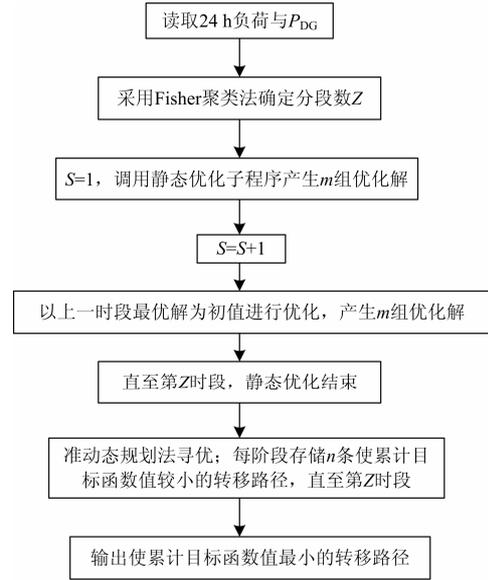


图 2 动态无功优化流程图

Fig. 2 Flow chart of dynamic reactive optimization

5 算例分析

本文采用 IEEE33 节点系统进行测试。安装有载调压变压器 1 台，参数为 31.5 MVA/110±8×1.25%/10.5；系统结构以及馈线并联电容器组和分布式电源的具体参数分别见图 3 和表 5。

系统的负荷曲线如图 4 所示，采用 Fisher 聚类算法对系统的负荷曲线进行分段，分段后的负荷曲线如图 5 所示。

取 $m=3$ ， $n=9$ ，找出累计目标函数值最小和较

小的 3 条转移路径, 如表 6 所示。

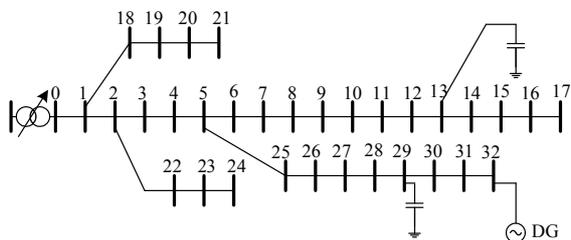


图 3 测试系统

Fig. 3 Test system

表 5 并联电容器组和分布式电源的参数

Table 5 Parameters of shunt capacitors and DGs for test system

类型	电压/ kV	最小功率 因数	额定有功/ kW	无功补偿/ kvar
C13	10	--	--	0~3×100
C29	10	--	--	0~3×300
DG	10	0.9	300	0~150

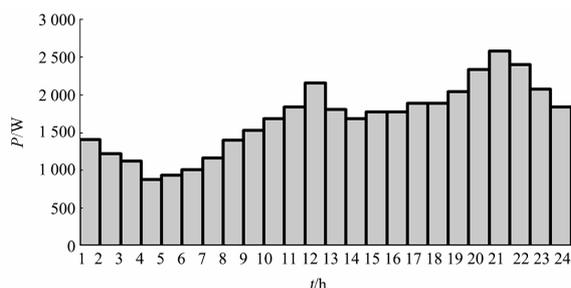


图 4 系统负荷曲线

Fig. 4 Load curve of system

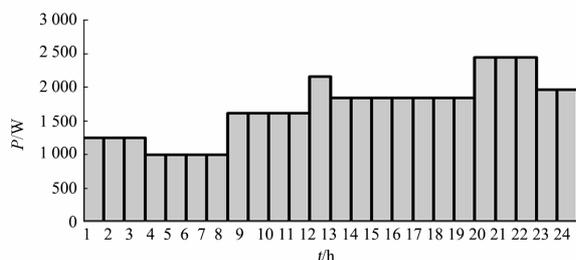


图 5 7 分段后的系统负荷曲线

Fig. 5 Seven-segment result of the daily load curve

该结果是在大控制时段取各小时分段的平均负荷优化得到, 其负荷水平与 24 h 实际负荷存在一定的差异。因此, 确定的网络损耗和运行总费用有一定的误差。但为了提高动态优化的求解效率, 并考虑到负荷分段已尽可能地贴近实际负荷水平, 认为平均负荷下的优化结果是可以接受的。由表 6 知, 1#转移路径的累计目标函数值最小, 为 1 041.8 元; 2#、3#转移路径略高, 分别为 1 042.4 元、1 043.2 元; 选取 1#转移路径作为最终的控制方案。

表 6 累计目标函数值最小和较小的 3 条转移路径

Table 6 Three optimal transfer pathswith the least of cumulative objective function

转移路径	控制时段	$T_{OLC}/\%$	C13/组	C29/组	Q_{DG}/kvar	$P_{\text{loss}}/\text{kW}$	$F/\text{元}$
1#	1#	1.25	2	1	70.4	51.1	97.6
	2#	0	1	1	50.2	45.4	112.2
	3#	-2.5	2	1	80.5	65.6	162.6
	4#	-3.75	2	1	95.4	88.5	55.1
	5#	-5	2	1	104.3	77.8	328.8
	6#	-6.25	2	2	117.4	102.6	187.9
	7#	-6.25	2	2	75.6	81.3	97.5
总计	7 次	4 次	2 次	2 062.9 kvarh	1 701.0 kWh	1 041.8	
2#	1#	1.25	2	1	70.4	51.1	97.6
	2#	0	1	1	50.2	45.4	112.2
	3#	-2.5	2	1	80.5	65.6	162.6
	4#	-3.75	2	2	95.4	85.6	54.6
	5#	-5	2	1	104.3	77.8	330
	6#	-6.25	2	2	117.4	102.6	187.9
	7#	-6.25	2	2	75.6	81.3	97.5
总计	7 次	4 次	4 次	2 062.9 kvarh	1 698.1 kWh	1 042.4	
3#	1#	1.25	2	1	70.4	51.1	97.6
	2#	1.25	1	1	50.2	45.7	110.9
	3#	-2.5	2	1	80.5	65.6	164.6
	4#	-3.75	2	2	95.4	85.6	54.6
	5#	-5	2	1	104.3	77.8	330
	6#	-6.25	2	2	117.4	102.6	187.9
	7#	-6.25	2	2	75.6	81.3	97.5
总计	7 次	4 次	4 次	2 062.9 kvarh	1 699.3 kWh	1 043.2	

计算控制方案在 24 h 实际负荷水平下的潮流, 得全天总网损为 1 720.4 kWh, 而取平均负荷时的全天总网损为 1 701.0 kWh, 误差为-1.1%, 在可接受范围内, 进一步验证了本文协调优化算法和分段算法的有效性。

本文对算例用不考虑动作次数的 24 h 静态优化(方法一)、不考虑协调优化的分时段静态优化(方法二)、本文多时段协调优化算法(方法三)进行计算对比。原运行状态为可调变压器分接开关档位为 0%, 所有电容器组均不投入, 燃料电池无功出力为 0 kvar。三种方案下系统各项优化指标对比如表 7 所示。由该表可以看出, 在设备日动作次数方面, 本文协调

优化法的调节次数是最少的，虽然网损电能费用略高，但设备调节费用最低，总运行费用也最少。

表 7 三种方案下系统各项优化指标对比

Table 7 Comparison of optimization indexes in three cases

类别	OLTC	C13	C29	$F_{\Delta W}$	F_B	F
原状态	--	--	--	1 403.4	--	1 403.4
方法一	31	15	11	1 017.4	93.2	1 110.6
方法二	7	4	4	1 030.9	23.6	1 054.5
方法三	7	4	2	1 032.2	21.2	1 053.4

注：OLTC-C29 列为设备日动作次数； $F_{\Delta W}$ 为全网网损电能费用(元)；

F_B 为全天设备调节费用(元)； F 为全天运行总费用(元)。

6 结论

1) 本文研究了控制设备动作次数的影响，调研了国内外设备动作次数现状。欧美发达国家一般不会对设备的动作次数加以限制，而国内却有着严格的限制。

2) 本文提出了一种基于改进遗传算法和准动态规划法的动态无功两层优化算法，应用于多时段的动态无功优化，兼顾算法的寻优速度和搜索精度，可依据电网规模灵活设置各阶段保留的最优路径数，适合于大规模系统的动态无功优化。

3) 典型算例计算结果表明：当负荷水平较小且电压满足要求时，一般不鼓励设备动作；当负荷水平较大时，调节设备带来的降损效益高于设备调节费用，电压质量也得到了改善，此时不宜限制设备的动作次数，优化时可以考虑将动态优化转化成多时段的静态优化。

4) 多时段无功优化算例验证了本文协调优化方法的有效性，获得了较为经济的控制设备全天动作方案。

参考文献

[1] 张鹏, 刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 49-53.
ZHANG Peng, LIU Yutian. A simplified dynamic programming approach to voltage/var control in distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(4): 49-53.

[2] LIANG R H, CHENG C K. Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 625-630.

[3] 刘明波, 朱春明, 钱康龄. 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 Mingbo, ZHU Chunming, QIAN Kangling. Dynamic reactive power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 34-40.

[4] 程军照, 李澍森, 程强. 一种无功优化预测校正内点算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 152-157.
CHENG Junzhao, LI Shusen, CHENG Qiang. A predictor-corrector interior point method for optimal reactive power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 152-157.

[5] 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 system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 34-38.

[6] 杨悦, 李国庆. 配电网动态无功优化空间-时间解耦的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 39-43.
YANG Yue, LI Guoqing. A new method for space-time decoupling of distribution network dynamic reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 39-43.

[7] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
LI Xinbin, ZHU Qingjun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.

[8] 王韶, 张煜成, 周鑫, 等. 基于一种改进蚁群算法的动态无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 100-104.
WANG Shao, ZHANG Yucheng, ZHOU Xin, et al. Dynamic reactive power optimization based on a modified ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 100-104.

[9] 王淳, 程浩忠, 陈恳. 配电网动态无功补偿的整体优化算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 109-114.
WANG Chun, CHENG Haozhong, CHEN Ken. Integrated optimization algorithm of dynamic reactive power for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 109-114.

[10] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al.

- Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [11] 董洁, 赵凤展, 杨仁刚. 采用启发式策略的动态无功优化混合算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 35-40.
- DONG Jie, ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Study on dynamic reactive power optimization hybrid algorithm using heuristic strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 35-40.
- [12] 张峰, 段余平, 邱军, 等. 基于粒子群算法与内点算法的无功优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 11-16.
- ZHANG Feng, DUAN Yuping, QIU Jun, et al. Research on reactive power flow based on particle swarm optimization and interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 11-16.
- [13] 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.
- [14] 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 Zhizhong. Optimal time-varying reactive power and voltage control in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 40-44.
- [15] 何佳, 吴耀武, 娄素华, 等. 基于微粒群优化算法的电力系统动态无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 47-51.
- HE Jia, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. Dynamic reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 47-51.
- [16] FISHER W D. On grouping for maximum homogeneity[J]. American Statistic Association Journal, 1958: 789-798.
- [17] 管宇. 数据挖掘中一种新的有序聚类方法[J]. 中国管理科学, 2011(19): 74-78.
- GUAN Yu. A new sequence clustering method in data mining[J]. Chinese Journal of Management Science, 2011(19): 74-78.
- [18] 王卫平, 王主丁. 含分布式电源的配网无功优化混合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 93-100.
- WANG Weiping, WANG Zhuding. A hybrid algorithm for reactive power optimization in distribution networks with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 93-100.

收稿日期: 2014-05-07 ; 修回日期: 2014-06-07

作者简介:

胡晓阳(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事配电网无功优化研究; E-mail: hxy20082209@sina.cn

王卫平(1985-), 男, 助理工程师, 从事电气设备检修、高压试验工作;

王主丁(1964-), 男, 教授, IEEE 高级会员, 研究方向为电力系统运行与优化研究。