

基于区间算术的含光伏电站的电网动态无功优化

为了解决光伏电站不确定性出力及负荷波动对动态无功优化的影响,提出了基于区间算术的含光伏电站的电网动态无功优化方法。引入区间数,建立了含光伏发电的区间潮流模型,并对遗传算法进行改进,将区间算术和改进后的遗传算法相结合,进行动态无功优化。动态无功优化的目标函数主要考虑全天24个时段的总区间网损,在常规的约束条件基础上,增加了相邻时段控制设备的动作限制,有效减少了设备的动作次数。最后,以IEEE 14节点系统进行案例分析,结果验证了该方法的正确性。

高峰 赵莹 朱伟民 李明/国网上海市电力公司金山供电公司

0 引言

相对于静态无功优化,电力系统动态无功优化较为复杂,需要考虑到负荷的变化及控制设备的动作次数限制。

文献[1]将设备动作成本加入到目标函数中,限制了设备的动作;文献[2]对OLTC相邻时段动作进行了约束,提高了模型的实用性;文献[3]选用合适的控制设备及动作时间的预定,从整体上进行动态无功优化;文献[4-5]设置了相邻时段动作次数限制的约束,有效地减少了设备的连续动作次数,提高了设备的使用效率。

随着分布式电源的发展,传统动态无功优化的方法已不完全适用,需要考虑到分布式电源出力的不确定性。为了提高含分布式电源电网动态无功优化的准确性,需要能够准确地对分布式电源出力进行描述。目前,可通过解析法、蒙特卡罗法、点估计法和模糊数学方法等^[6]描述不确定性问题。文献[7]建立了

模糊潮流模型,可准确描述分布式电源的不确定性出力;文献[8]从概率分布的角度描述负荷及分布式电源出力的不确定性;文献[9]则通过区间数来描述一段时间的风速变化,准确地对风电出力进行建模,有效解决了风电出力不确定性问题。然而,文献[9]只是用区间数进行潮流计算,没有用来进行无功优化。在其基础上,提出了基于区间算术的含光伏电站的电网动态无功优化方法,建立了区间潮流模型,提出了主要考虑全天24个时段总区间网损最小的目标函数。在此基础上,通过改进遗传算法进行动态无功优化。

1 相关基础概念

1.1 区间数的定义

区间数可以用来处理不确定性问题。可通过区间分析计算不确定性问题的上下界^[10]。

存在数 $\underline{x}$ 和 $\bar{x} \in R$, $\underline{x} \leq \bar{x}$, 区间数 $\tilde{x}$ 可写为: $\tilde{x} = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$, 其中, $\underline{x}$ 、 $\bar{x}$ 分别为区间的下限和上限。区间运算法参见文献[11]。

1.2 光伏电站出力区间

采用云层系数区间 $\tilde{I}$ 来描述云层的变化。光照强度与云层系数的关系为

$$\tilde{G}_T = \tilde{I} G_a \quad (1)$$

式中, $\tilde{G}_T$ 为光照强度区间; G_a 为大气层外光照强度。不同天气情况对应的 $\tilde{I}$ 见文献[12]。

光伏出力区间 $\tilde{P}$ 可写为



高峰/工程师

关键词/Keywords

区间算术 ·
光伏电站 ·
动态无功优化 ·
改进遗传算法 ·

$$\tilde{P}_{PV} = \eta A_{PV} \tilde{G}_T [1 - 0.005(T_a + C\tilde{G}_T - 25)] \quad (2)$$

式中, η 为光电转换效率; A_{PV} 为光伏阵列面积, m^2 ; T_a 为环境温度, $^{\circ}C$; C 为常数, 取0.03。

1.3 区间潮流求解

潮流方程可表示为

$$\tilde{P}_i - \tilde{P}_{Di} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{Di} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

式中, $\tilde{P}_i$ 、 $\tilde{P}_{Di}$ 为节点 i 有功注入区间、有功负荷区间; $\tilde{Q}_i$ 、 $\tilde{Q}_{Di}$ 为节点 i 无功注入区间、无功负荷区间; U_i 为节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 为电导、电纳; θ_{ij} 为电压相角差。

式(3)、式(4)可写为

$$h(x) = 0 \quad (5)$$

首先要求Krawczyk-Moore算子^[13]。设定自变量初值为

$$X = \begin{pmatrix} \tilde{V} \\ \tilde{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [v_{\min}, v_{\max}] \\ [\theta_{\min}, \theta_{\max}] \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 为电压幅值限值; $\theta_{\min}$ 、 $\theta_{\max}$ 为电压相角限值。

取中点 $\text{mid}(X)$ 为近似零点 x^* , $h(x)$ 在 $\text{mid}(X)$ 的值为 $h(x^*)$ 。

式(5)中, $h(x)$ 雅可比矩阵的具有包含单调性的区间扩展为

$$H'(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial P_j}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$; $j=(m+1), (m+2), \dots, (n-1)$ 。

$T = [m(H'(X))]^{-1}$, 这就得到了Krawczyk-Moore算子, 即

$$K = x^* - Th(x^*) + [I - TH'(X)](X - x^*) \quad (8)$$

利用 K 算子进行迭代, 即

$$\begin{cases} X(k+1) = X^{(k)} \cap K^{(k)} \\ k=1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (9)$$

即得到潮流方程电压、相角的区间解^[13]。

2 区间动态无功优化模型

2.1 目标函数

本文的目标函数为

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} \text{mid}[\tilde{P}_{\text{loss},t}(Q_t, T_t, V_t)] \quad (10)$$

式中, $\text{mid}[\tilde{P}_{\text{loss},t}(Q_t, T_t, V_t)]$ 为时段 t 网损区间 $\tilde{P}_{\text{loss},t}(Q_t, T_t, V_t)$ 中值。

式(10)包含了全天24时段总区间网损。

2.2 约束条件

等式约束条件用式(3)、式(4)表示。

不等式约束条件为

$$[V_{ti}, \overline{V_{ti}}] \subseteq [V_{ti}^{\min}, \overline{V_{ti}^{\max}}] \quad (11)$$

$$Q_{C\min} \leq Q_C \leq Q_{C\max} \quad (12)$$

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (13)$$

$$S_{Ti} \leq \overline{S}_T \quad (14)$$

$$S_{Ci} \leq \overline{S}_C \quad (15)$$

$$\sum_{t=l}^{l+k} (T_{i,t} \oplus T_{i,t+1}) < 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t=l}^{l+k} (C_{i,t} \oplus C_{i,t+1}) < 1 \quad (17)$$

式中, $[V_{ti}, \overline{V_{ti}}]$ 、 $[V_{ti}^{\min}, \overline{V_{ti}^{\max}}]$ 为时段 t 节点 i 区间电压及限值; $Q_C = [Q_{C1}, Q_{C2}, \dots, Q_{C24}]^T$ 、 $Q_{C\min}$ 和 $Q_{C\max}$ 为全天电容器补偿容量向量及限值; $T = [T_1, T_2, \dots, T_{24}]^T$ 、 $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 为全天变压器分接头档位向量及限值; S_{Ti} 、 $\overline{S}_T$ 为全天变压器 i 分接头动作次数及限值; S_{Ci} 、 $\overline{S}_C$ 为全天电容器 i 投切次数及限值; $\oplus$ 为异或; $T_{i,t}$ 、 $C_{i,t}$ 为时段 t 变压器 i 的档位和电容器补偿容量。

式(16)、式(17)为相邻时段动作约束, 可有效限制控制设备连续动作。

3 区间动态无功优化的求解

3.1 改进遗传算法

对传统GA改进如下。

1) 设置两个种群, 将约20%的较优秀个体放入种群1中, 其余80%放入种群2中。每次迭代后, 将种群1中最差个体和种群2中最优秀个体比较,

将优秀个体放入种群1中。通过竞争来保证进化,增强全局搜索能力。

2) 改进适应度函数。迭代初期可表示为

$$J = \frac{1}{F} \quad (18)$$

式中, F 为动态无功优化的目标函数。

到了迭代后期, 主要任务应该是寻找满足约束条件的最优解, 淘汰不满足约束条件的个体。因此, 适应度函数可设计为

$$J = e^{-F} \quad (19)$$

通过上述分阶段适应度函数进行搜索, 能够提高搜索效率, 尽快搜索到全局最优解。

3) 采用自适应交叉率 P_c 和变异率 P_m 。当 $F_{\max}$ 和 F_{av} 相近时, 种群趋于收敛, 应增大 P_c 、 P_m 。为保护优良个体结构, 应降低 J 较大个体的 P_c 、 P_m , 增大 J 较小个体的 P_c 、 P_m 。具体操作如下。

$$P_c = \begin{cases} P_c \cdot \frac{F_{\max} - X_1}{F_{\max} - F_{\text{av}}} & \text{当 } X_1 \geq F_{\text{av}} \\ P_c & \text{当 } X_1 < F_{\text{av}} \end{cases} \quad (20)$$

$$P_m = \begin{cases} P_m \cdot \frac{F_{\max} - Y}{F_{\max} - F_{\text{av}}} & \text{当 } Y \geq F_{\text{av}} \\ P_m & \text{当 } Y < F_{\text{av}} \end{cases} \quad (21)$$

式中, $F_{\max}$ 、 F_{av} 为种群最大、平均适应度函数值; X_1 为交叉时较优个体的适应度函数值; Y 为变异个体的适应度函数值。

3.2 控制设备预动作表

传统预动作表主要根据 $\Delta K_{i,t}$ 的大小进行排序, 分配动作权限, 文献[16]详细介绍了其形成过程。本文在其基础上又考虑了负荷的变化。步骤如下。

设时段 t 负荷区间为 $\tilde{f}_t = [\underline{f}_t, \overline{f}_t]$ 。则相邻时段负荷变化量 $\Delta \tilde{f}_t$ 为

$$\Delta \tilde{f}_t = \tilde{f}_t - \tilde{f}_{t-1} \quad (22)$$

计算 $\Delta \tilde{f}_t$ 和 $\Delta k_{i,t}$ 的乘积 $\Delta \tilde{f}_t \Delta k_{i,t}$

$$\Delta \tilde{f}_t \Delta k_{i,t} = \Delta \tilde{f}_t \Delta k_{i,t} = [\Delta \underline{f}_t \Delta k_{i,t}, \Delta \overline{f}_t \Delta k_{i,t}] \quad (23)$$

式中, $\Delta k_{i,t} = |k_{i,t} - k_{i,t-1}|$, $k_{i,t}$ 为时段 t 控制设备 i 的动作值。

根据 $\max\{|\Delta \underline{f}_t \Delta k_{i,t}|, |\Delta \overline{f}_t \Delta k_{i,t}|\}$ 来分配动作权限, 形成预动作表。

3.3 求解步骤

(1) 第一步: 静态无功优化。

1) 初始化种群。

2) 区间潮流计算。得到各节点电压区间、网损区间, 计算个体的适应度函数值。

3) 根据适应度函数值, 将种群2中最优个体和种群1中最差个体作比较, 将较优的保存至种群1中。

4) 进行选择、交叉和变异操作。 P_c 、 P_m 根据式(20)、式(21)实时更新。

5) 若 $k > k_{\max}$ 成立, 则输出结果。否则, $k = k + 1$, 返回步骤2。

用上述方法, 对24时段分别进行静态无功优化, 并采用3.2节方法形成设备预动作表。

(2) 第二步: 动态调整。

1) 令 $t = 2$, 读取设备预动作表。

2) 静态无功优化。从当前预动作表中读取允许动作的控制变量。计算本时段控制设备新的动作值, 并求出 $\max\{|\Delta \underline{f}_t \Delta k_{i,t}|, |\Delta \overline{f}_t \Delta k_{i,t}|\}$ 。

3) 重新分配设备动作权限。根据步骤2得到的 $\max\{|\Delta \underline{f}_t \Delta k_{i,t}|, |\Delta \overline{f}_t \Delta k_{i,t}|\}$, 计算 $t \sim 24$ 时段控制变量新的变化值, 重新分配设备动作权限。

4) 若 $t > 24$ 成立, 则输出最终结果。否则, $t = t + 1$, 返回步骤2。

优化流程如图1所示。

4 算例分析

以IEEE 14节点系统进行案例分析, 系统参数见文献[17]。在14号节点接入额定功率为3 MW的光伏电站, 在节点5、节点7、节点10和节点13处均接入8组0.1 Mvar的并联电容器。光照强度区间见文献[12], 负荷数据采用文献[18]中的预测数据。控制设备动作次数限值为10次。改进GA算法中, 设置两个种群, $N_1 = 20$, $N_2 = 80$, 采用十进制编码, $k_{\max} = 300$, $P_{c0} = 0.7$, $P_{m0} = 0.3$ 。优化前后全天24个时段的网损区间, 如表1所示。

由表1可知, 相对于优化前, 优化后系统总网损区间为[3.345, 3.457], 降损效果明显。

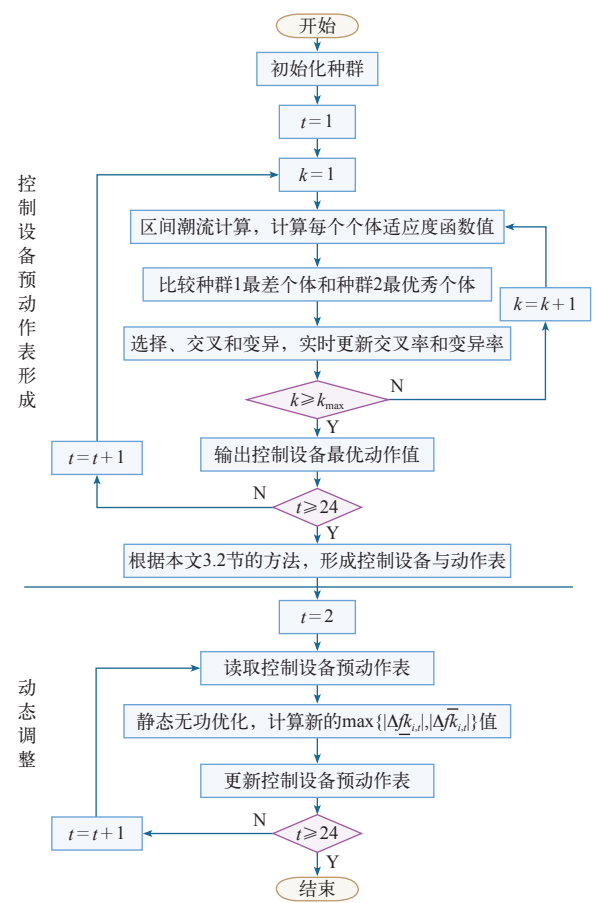


图1 动态无功优化流程

表1 各时段网损区间对比

t	优化前	优化后	t	优化前	优化后
1	[0.143, 0.145]	[0.125, 0.131]	13	[0.143, 0.147]	[0.129, 0.135]
2	[0.133, 0.139]	[0.121, 0.124]	14	[0.140, 0.149]	[0.126, 0.131]
3	[0.133, 0.139]	[0.122, 0.124]	15	[0.166, 0.176]	[0.151, 0.154]
4	[0.130, 0.133]	[0.119, 0.123]	16	[0.157, 0.168]	[0.151, 0.154]
5	[0.131, 0.133]	[0.118, 0.122]	17	[0.159, 0.168]	[0.160, 0.163]
6	[0.121, 0.124]	[0.120, 0.123]	18	[0.160, 0.168]	[0.158, 0.163]
7	[0.130, 0.135]	[0.125, 0.131]	19	[0.155, 0.162]	[0.155, 0.162]
8	[0.133, 0.137]	[0.129, 0.134]	20	[0.153, 0.163]	[0.152, 0.157]
9	[0.144, 0.150]	[0.141, 0.149]	21	[0.172, 0.175]	[0.155, 0.162]
10	[0.168, 0.174]	[0.146, 0.153]	22	[0.169, 0.173]	[0.152, 0.157]
11	[0.169, 0.172]	[0.154, 0.157]	23	[0.166, 0.170]	[0.152, 0.158]
12	[0.171, 0.174]	[0.153, 0.157]	24	[0.153, 0.160]	[0.141, 0.146]
总	$\bar{P}_{loss1total} = [3.599, 3.734]$; $\bar{P}_{loss2total} = [3.345, 3.457]$				

由于篇幅限值，在此不能一一列出所有电容器和变压器分接头的动作情况，下面以节点5处的电容器为例。图2、图3为节点5处电容器24个时段全部为静态无功优化的动作值及动态无功优化后

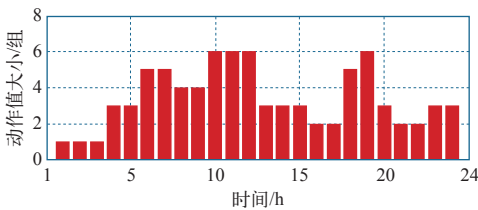


图2 静态无功优化

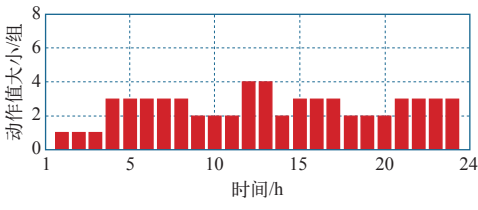


图3 动态无功优化

的动作值。
由图2可以看出，根据各时段静态优化的结果，节点5处的电容器全天一共动作了12次，超出了限值，而如果采用动态无功优化，全天一共动作了8次（见图3），符合规定。

表2为控制设备优化结果，方案a为24时段均采用静态无功优化计算。方案b为未并入光伏电站动态无功优化计算。方案c为并入光伏电站后动态无功优化计算。

表2 控制设备优化结果

控制设备	方案		
	a	b	c
C ₅	12	9	8
C ₇	14	7	6
C ₁₀	11	5	3
C ₁₃	9	8	5
T ₄₋₇	11	8	4
T ₄₋₉	12	6	5
T ₅₋₆	11	6	3
总数	80	49	35

从表2可知，根据方案a的策略，几乎所有控制设备动作次数将超限。而动态无功优化后，各控制设备的动作次数均符合规定，少于10次。而且由于光伏电站的无功调节能力，方案c并入光伏电站后，设备的动作次数更少。

5 结束语

1) 引入区间数，建立了含光伏电站的区间潮

流模型。

2) 建立了考虑全天24个时段总区间网损最小的目标函数。在常规的约束条件基础上, 设置了相邻时段控制设备动作限制, 减少了设备动作次数。

3) 对遗传算法进行改进, 将区间算术和改进后的GA结合, 进行动态无功优化。案例表明, 根据该方法得出的策略进行调节, 能有效地减少控制设备的动作次数, 降低网损。

参考文献

- [1] 张勇军, 俞悦, 任震, 等. 实时环境下动态无功优化建模研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 12-15.
- [2] 田甜. 动态无功优化使用模型及启发式混合智能算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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): 71-75.
- [6] 胡丽娟, 刘科研, 盛万兴, 等. 含随机出力分布式电源的配电网静态电压稳定快速概率评估方法 [J]. 电网技术, 2014, 38 (10): 2766-2771.
- [7] 张焰, 陈章潮. 计及不确定性的模糊交流潮流计算方法研究 [J]. 电网技术, 1998, 22 (2): 20-22.
- [8] 郭康, 徐玉琴, 张丽, 等. 计及光伏电站随机出力的配电网无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (10): 53-58.

- [9] 王守相, 徐群, 张高磊, 等. 风电场风速不确定性建模及区间潮流分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (21): 82-86.
- [10] 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.
- [11] Tomsovic K. A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (1): 287-293.
- [12] 韩亮, 王守相. 含光伏风电的基于仿射算法的配电三相潮流计算 [J]. 电网技术, 2013, 37 (12): 3413-3418.
- [13] 王德人, 张连生, 邓乃扬. 非线性方程的区间算法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [14] Manson G. Calculating frequency response functions for uncertain systems using complex affine analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288 (3): 487-521.
- [15] Vaccaro A, Canizares C A, Villacci D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power System, 2010, 25 (2): 624-632.
- [16] 蔡昌春, 张建勇. 计及分布式发电的动态无功优化 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (6): 39-44.
- [17] 张伯明. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [18] 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, 2008, 32 (5): 43-46.

(收稿日期: 2015-04-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告