

基于改进平衡优化器算法的电网动态无功优化

朱俊伟,何锋,陈培星

(国网福建省电力有限公司莆田供电公司,福建 莆田 351100)

摘要:随着新能源发电的不断接入以及电力线路电缆化程度的不断提升,新型电力系统电压越限问题越来越突出。针对这一问题,建立了综合考虑有功、无功功率倒送的电网动态无功优化模型,以系统网络损耗、电压偏差以及设备动作成本为目标函数。将自适应生成概率、余弦平衡池策略引入到平衡优化器算法不同阶段,以此改善算法的收敛速度和精度,并利用其进行动态无功优化模型求解。最后,通过改进的IEEE33节点系统进行仿真分析,结果显示所设计算法的优化结果优于其他算法,能够降低系统网损并提高电网无功电压质量。

关键词:新型电力系统;电压越限;改进平衡优化器算法;动态无功优化

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25889

Dynamic Reactive Power Optimization Method for Power Grid Based on Improved Equilibrium Optimizer Algorithm

ZHU Junwei, HE Feng, CHEN Peixing

(Putian Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Putian 351100, Fujian, China)

Abstract: With the continuous integration of new energy generation and the increasing degree of power line cabling, the problem of voltage exceeding limits in new type power system is becoming increasingly prominent. A dynamic reactive power optimization model for new type power grids was established to address this issue, taking into account both active and reactive power backflow. The objective functions were system network losses, voltage deviations, and equipment operation costs. Introduced adaptive generation probability and cosine balance pool strategy into different stages of the equilibrium optimizer algorithm to improve the convergence speed and accuracy of the algorithm, and used it to solve the dynamic reactive power optimization model. Finally, simulation analysis was conducted on an improved IEEE33 node system, and the results show that the optimization results of the designed algorithm were superior to other algorithms, which can reduce system losses and improve the quality of reactive power and voltage in the power grid.

Key words: new type power system; voltage limit exceedance; improved equilibrium optimizer (IEO) algorithm; dynamic reactive power optimization

近年来,电网中大量架空线落地电缆化使得线路电缆的充电电容容量不断提高,造成电网无功功率倒送严重。另外,新能源并网的装机容量不断增加,其供电间歇性、不稳定性加大电网控制难度,有功功率倒送也时有发生。有功功率和无功功率倒送造成电网电压越限严重,使得传统无功电压控制面临新的挑战^[1-3]。无功电压控制本质上是通过控制无功补偿设备的无功出力,优化系统无功潮流分布,从而提高系统运行的经济

性和稳定性^[4-9]。电网动态无功优化问题是一个非线性、含离散优化变量的复杂优化问题^[9]。传统的数学优化方法如内点法、牛顿法等,在寻优过程中对初始解的依赖性较高,容易陷入局部最优解,导致寻优结果质量较低^[10-13]。

智能算法因其对初值不敏感、收敛性好等优点,在无功优化中的应用越来越广泛,其中平衡优化器算法(equilibrium optimizer, EO)因搜索能力强、结构简单易实现而广泛应用于连续或离散、

基金项目:福建省电力公司科技项目(521320240006)

作者简介:朱俊伟(1990—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化,Email:flood_cai@163.com

单目标或多目标问题的求解中。然而,在应用过程中也存在算法开发与勘探能力难以平衡、迭代后期易陷入停滞等缺陷问题^[14-15]。比如,针对基本平衡优化器算法在求解高维问题易出现迭代停滞现象,文献[16]在平衡优化器算法中引入逐维高斯变异机制和贪婪策略避免算法早熟;文献[17]通过改进的参考点方法改进平衡优化器算法,有效避免算法陷入进化停滞;文献[18]通过精英反向学习策略提高种群初质量,采用 IPOX 交叉、MPX 交叉和变异操作保持潜在最优解的多样性,引入 Metropolis 准则防止陷入局部最优;文献[19]将平衡优化器算法应用到无功优化领域,通过改进生成概率平衡算法勘探与开发能力,解决了基本平衡优化器算法在迭代后期易陷入局部最优解的问题。

针对优化平衡器算法在电网无功优化求解中存在的问题,本文提出了一种改进平衡优化器算法(improved equilibrium optimizer, IEO)的电力系统无功优化方法。首先,结合新型电力系统特性,以网损、电压偏差以及设备投切成本为目标函数,协调不同无功调压设备的调节特性,构建电网动态无功模型;接着,针对无功调压过程中的变量混合问题,将自适应生成概率、余弦平衡池引入到优化平衡器算法不同阶段,提升算法跳出局部最优解的能力;最后,基于改进的 IEEE33 系统进行仿真分析,实验结果验证了本文方法的有效性和合理性,相较于其他经典算法具有收敛快、精度高的优点。

1 动态无功优化建模

本文针对电网实际运行情况,构建以有功网损最小、电压偏差最小、无功调度成本最小、变压器调度成本最小为目标函数的电网动态无功多目标优化模型。目标函数由以下4部分组成:

1)有功损耗 P_{loss} :

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i,j=1}^{n+m} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

式中: n 为负载节点数量; m 为无功源数量; $n+m$ 为电网总节点数; G_{ij}, θ_{ij} 分别为节点*i*与节点*j*之间的电导和相位差; U_i, U_j 分别为节点*i*和节点*j*的电压。

2)电压偏差 U_d :

$$\min U_d = \sum_{i=1}^{n+m} |U_i - U_i'| \quad (2)$$

式中: U_i' 为节点*i*的目标电压。

3)无功调度成本 Q_{all} :

$$\min Q_{\text{all}} = Q_{\text{cost}} (\Delta Q_{\text{MCRall}} + \Delta Q_{\text{Lall}}) \quad (3)$$

其中

$$\Delta Q_{\text{Lall}} = \sum_{i=1}^{n_L} |k_{Li}(t) - k_{Li}(t-1)| \Delta Q_{\text{Lmin}} \quad (4)$$

$$\Delta Q_{\text{MCRall}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{MCR}}} |Q_{\text{MCR}i}(t) - Q_{\text{MCR}i}(t-1)| \quad (5)$$

式中: Q_{cost} 为无功调度成本系数; $Q_{\text{MCR}i}(t)$ 为*t*时刻 MCR 的无功补偿量; ΔQ_{MCRall} 为 MCR 的无功补偿变化量; ΔQ_{Lall} 为电抗器组无功补偿变化量; $k_{Li}(t)$ 为*t*时刻电抗器投切数; ΔQ_{Lmin} 为电抗器一次投切的无功补偿差值; n_{MCR}, n_L 分别为 MCR 总数与电抗器总数。

4)变压器分接头挡位变化成本 T_{all} :

$$\min T_{\text{all}} = T_{\text{cost}} \sum_{i=1}^y |k_{Ti}(t) - k_{Ti}(t-1)| \quad (6)$$

式中: T_{cost} 为变压器分接头变档成本系数; T_{all} 为变压器分接头变档数之和; $k_{Ti}(t)$ 为变电器*i*在*t*时刻分接头挡位; y 为变电器总数。

考虑电抗器组与变压器有最小投切量 ΔQ_{Lmin} 与最小变比 ΔT_{min} 的限制,对电抗器组的投切数以及变压器档位做出限制:

$$k_{Li}(t) = \eta_L \quad \eta_L = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (7)$$

$$k_{Ti}(t) = \eta_T \quad \eta_T = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (8)$$

式中: η_L, η_T 为整数,表示电抗器组投切数与变压器档位为整数。

无功优化多目标函数表示如下:

$$\min F = \varphi_1 P'_{\text{loss}} + \varphi_2 U'_d + \varphi_3 Q'_{\text{all}} + \varphi_4 T'_{\text{all}} \quad (9)$$

式中: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 为权重系数,其通过层次分析法确定; P'_{loss} 为有功网损 P_{loss} 的满意度; U'_d 为电压偏差 U_d 的满意度; Q'_{all} 为无功设备动作成本 Q_{all} 的满意度; T'_{all} 为变压器动作成本 T_{all} 的满意度。满意度函数取值范围为[0, 1],数值越小代表满意度越高。

无功优化需要建立在电网正常运行的前提下,因此无功优化模型需要满足以下约束条件:

1)潮流约束:

$$P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

式中: G_{ij}, B_{ij} 分别为节点*i*与*j*间线路的电导与电纳; P_{Gi}, P_{Li} 分别为分布式电源与负载的有功功率; Q_{Gi}, Q_{Li} 分别为分布式电源与负载的无功功

率; Q_{Ci} 为电缆的充电功率。

2)电压约束:

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (12)$$

式中: U_{imin}, U_{imax} 分别为节点*i*电压约束下限与上限。

3)无功源出力约束:

$$\begin{cases} Q_{MCRmin} \leq Q_{MCR} \leq Q_{MCRmax} \\ Q_L = k_L \Delta Q_{Lmin} \\ k_{Lmin} \leq k_L \leq k_{Lmax} \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q_{MCR}, Q_L 分别为MCR与电抗所提供的无功功率; Q_{MCRmin}, Q_{MCRmax} 分别为MCR提供无功的上、下限; k_L 为电抗投切数量,为离散值; k_{Lmin}, k_{Lmax} 分别为投切数量的上、下限。

4)电抗器组投切速度限制:

$$|k_L(t) - k_L(t+1)| \leq \Delta k_{max} \quad (14)$$

式中: $k_L(t), k_L(t+1)$ 分别为*t*时段与*t+1*时段电抗器投切数量; Δk_{max} 为单位时段内投切数量最大值(因电抗器投切会引起电网波动,单位时段内投切数量有限制)。

5)变压器变比限制:

$$\begin{cases} T = k_T \Delta T_{min} \\ k_{Tmin} \leq k_T \leq k_{Tmax} \end{cases} \quad (15)$$

式中: T 为变压器变比; ΔT_{min} 为不同挡位间变比变化量; k_{Tmin}, k_{Tmax} 分别为分接头挡位下限与上限。

6)无功全天调度与分接头变档限制:

$$\begin{cases} |Q_{MCR}(t) - Q_{MCR}(t+1)| \leq \Delta Q_{max}(t) \\ \sum_{t=0}^{23} |Q_{MCR}(t) - Q_{MCR}(t+1)| \leq Q_{max} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} |k_L(t) - k_L(t+1)| \leq \Delta k_{max}(t) \\ \sum_{t=0}^{23} |k_L(t) - k_L(t+1)| \leq k_{max} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} |k_T(t) - k_T(t+1)| \leq \Delta T_{max}(t) \\ \sum_{t=0}^{23} |k_T(t) - k_T(t+1)| \leq T_{max} \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta Q_{max}(t) = \frac{Q_{max}|P(t) - P(t-1)|}{\sum_{i=1}^{23} |P(i) - P(i-1)|} \\ \Delta k_{max}(t) = \frac{k_{max}|P(t) - P(t-1)|}{\sum_{i=1}^{23} |P(i) - P(i-1)|} \\ \Delta T_{max}(t) = \frac{T_{max}|P(t) - P(t-1)|}{\sum_{i=1}^{23} |P(i) - P(i-1)|} \end{cases} \quad (19)$$

式中: Q_{max}, k_{max} 分别为一天内MCR与电抗器所能调度的量; T_{max} 为变压器分接头一天变档次数; $\Delta Q_{max}(t), \Delta k_{max}(t), \Delta T_{max}(t)$ 分别为*t*时段MCR、电抗器组与变压器的最大调度值,依照预测功率中前后两个时段的电网总功率差确定; $P(t)$ 为将一天划分为24个时段时,第*t*时段的平均负荷功率。

2 基于改进平衡优化器的无功优化计算

2.1 基本平衡优化器算法(EO)

平衡优化器算法是由Faramarzi等人于2020年提出的基于控制容积质量平衡物理现象的元启发式算法。质量平衡方程体现了控制容积内质量进入、离开及生成的物理过程,一般采用一阶微分方程来描述:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G \quad (20)$$

式中: V 为受控容器的容积; Q 为流入或流出的溶液流速; C_{eq} 为容器内平衡状态下的浓度; G 为容器内的质量生成速率; C 为容积内当前溶液浓度。

EO通过模仿式(20)的微分方程,其迭代式为

$$C = C_{eq} + (C - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda}(1 - F) \quad (21)$$

式中: F 为*F*系数,决定算法在开发和探索之间的平衡。

$(C - C_{eq})F$ 与 $G(1 - F)/\lambda$ 反映浓度的变化。 $(C - C_{eq})F$ 为算法提供探索能力,通过引起个体在平衡点附近的剧烈变化增加解的多样性,防止陷入局部最优解; $G(1 - F)/\lambda$ 提供开发能力,较小的变化值能让解达到最优。

在EO迭代过程中,主要通过更新五精英领导平衡池参数 $C_{eq,pool}$, F 系数和质量生成速率*G*等系数,实现算法的更新迭代。

平衡池参数定义式如下式所示:

$$C_{eq,pool} = \{C_{eq(1)}, C_{eq(2)}, C_{eq(3)}, C_{eq(4)}, C_{eq(ave)}\} \quad (22)$$

式中: $C_{eq(1)} \sim C_{eq(4)}$ 为本次迭代中最优的4个解; $C_{eq(ave)}$ 为这4个解的均值。

在EO算法中, F 系数用来调节容积内浓度变化,综合考虑算法的局部与全局搜索能力确保算法收敛,定义*F*系数如下式所示:

$$\begin{cases} F = a_1 \text{sign}(r - 0.5) [e^{a_2 - 1}] \\ t = (1 - \frac{t}{T})^{(a_2 \frac{t}{T})} \end{cases} \quad (23)$$

式中: a_1 为常数2; a_2 为常数1;sign为符号函数; r ,

λ 为 $[0, 1]$ 之间的随机值; t, T 为当前迭代次数与最大迭代次数。

质量生成速率 G 通过改进局部寻优能力提高算法解的精度, 如下式所示:

$$G = G_{cp} F(C_{eq} - \lambda C) \quad (24)$$

$$G_{cp} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases}$$

式中: r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机值; GP 为常数 0.5。

GP 取值越小越利于勘探, 即全局寻优能力, 越大则利于开发, 即局部寻优能力。

平衡优化器算法的最终收敛状态为平衡状态, 迭代前期种群通过候选解为种群提供收敛依据。利用前 4 个最优解有助于算法对未知环境的开发, 而平均候选解有利于优化深度的勘探。

2.2 改进平衡优化器算法 (IEO)

平衡优化器算法在求解高维问题时, 会出现停滞现象的问题。通过自适应生成概率 GP 提高算法的局部与全局搜索能力, 让算法的不同迭代时期具有不同的勘探能力。自适应生成概率如下式所示:

$$GP = \begin{cases} 1 - \frac{2t}{T} & t \leq \frac{T}{2} \\ \frac{2t}{T} - 1 & t > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (25)$$

平衡池直接影响算法迭代方向, 因此对其进行改进。在迭代初期, 使用固定角频率余弦振荡模式快速搜索解空间; 在迭代后期, 使用变化角频率余弦递增模式, 通过柯西分布的“长跳”特性提高解的步长变化以提高算法在优质解空间附近的开发能力。改进余弦池策略定义如下:

$$S = \begin{cases} \frac{(T-t)(1+\cos 2\pi\omega_1 t)}{4T} + \frac{1}{2} & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \frac{t(1+\cos 2\pi\omega_2 t)}{4T} + \frac{1}{2} & \frac{T}{2} < t \leq T \end{cases} \quad (26)$$

$$\omega_2 = \int f_c(x; \varphi, \gamma) dx \quad (27)$$

$$f_c(x; \varphi, \gamma) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\gamma}{(x-T)^2 + \gamma^2} \quad (28)$$

式中: ω_1 为固定频率 0.5; ω_2 为包含迭代次数与搜索维度信息的柯西分布; γ 为搜索维度; x 的取值范围为 $[0, T]$; $f_c(\cdot)$ 为柯西分布的概率密度函数。

结合上述计算得到的余弦池 S 构建新的平均候选解 $C'_{eq(ave)}$, 与 $C_{eq(1)}, C_{eq(2)}, C_{eq(3)}, C_{eq(4)}$ 构成余弦池 $C'_{eq,pool}$, 如下式所示:

$$C'_{eq(ave)} = SC_{eq(ave)} \quad (29)$$

$$C'_{eq,pool} = \{C_{eq(1)}, C_{eq(2)}, C_{eq(3)}, C_{eq(4)}, C'_{eq(ave)}\} \quad (30)$$

2.3 基于改进平衡优化器算法的动态无功优化

将全天 24 h 的无功优化问题转化为 24 个相互耦合、互不独立的, 负荷采用各自时段均值的静态无功优化问题。在每次优化前, 系统会读取所要优化时段的发电设备出力、负荷变化系数、设备动作次数的限制以及前一时段无功设备状态。结合上文提到的电网无功优化模型、IEO 算法, 基于 IEO 的电网无功优化方案如图 1 所示, 具体步骤如下:

1) 将一日分为 24 个时段, 计算电网节点每个时段的有功、无功功率均值作为该时段的节点功率数据。

2) 确定有功网损、电压偏差、无功设备动作成本、变压器动作成本的权重系数, 构造目标函数。

3) 读取本时段变压器变比等数据以及负荷数据, 记录前一时段无功设备状态、设备剩余动作次数。第一时段前的设备状态依照实际情况设置。

4) 计算未优化情况下的有功网损以及节点电压距离目标电压的偏差量, 使用 IEO 计算仅以有功网损为目标函数优化后的有功网损、仅以节点电压偏差量为目标函数优化后的电压偏差, 求

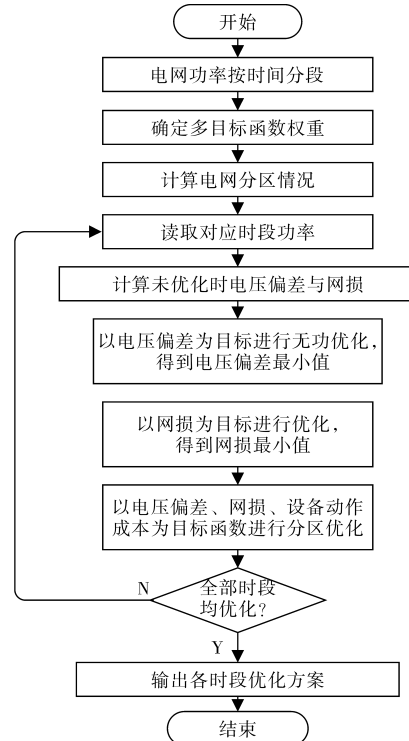


图 1 无功优化流程图

Fig.1 Reactive power optimization flowchart

解满意度。

5)利用改进平衡优化器算法进行分区无功优化模型求解,计算有功网损、电压偏差、无功设备动作成本及变压器动作成本的满意度,通过步骤1)中确定的权重系数组合为目标函数,综合考虑离散设备动作次数约束等,得到该时段日前电网无功优化控制方案。

6)重复步骤3)至步骤5),直到确定所有时段的日前电网无功优化控制方案。

3 算例分析

3.1 仿真参数设计

本文以 IEEE33 系统验证所提供方法的有效性,系统结构如图 2 所示。系统基准电压 12.66 kV,基准功率 10 MW。图 2 中虚线表示电缆线路,所连接节点注入无功功率模拟电缆充电功率,分布式光伏分别接入节点 6,23,18,33,光伏与电缆带来的节点有功与无功功率修正情况如表 1 所示。光伏出力会随时间变化,将最大出力视为 1,其一日内出力变化曲线如图 3 所示。无功补偿设备包括电抗器组和 MCR 分别接入节点 5,7,15,17,22,24 和节点 30,32,位于节点 1 与 2 间的变压器变比可调,对应的参数及上、下限如表 2 所示。将最大负荷视为 1,各时段负荷变化情况如图 4 所示,有功功率与无功功率视为一同变化。

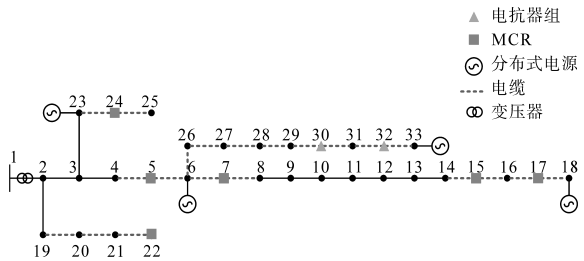


图2 IEEE33系统拓扑

Fig.2 IEEE33 system topology diagram

表1 电网节点、支路功率修正

Tab.1 Power correction of power grid nodes and branches

节点	有功输入/MW	节点 $i \sim j$	无功注入/Mvar
6	0.1	4~8	0.15
18	0.5	11~18	0.15
23	0.1	19~22	0.15
33	0.5	23~25	0.15
-	-	26~33	0.15

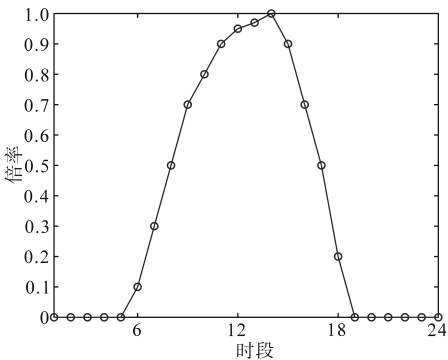


图3 各时段光伏出力情况

Fig.3 Photovoltaic output at different time periods

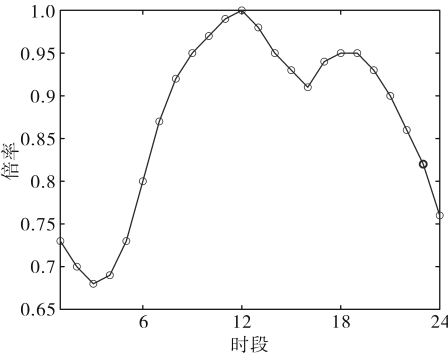


图4 各时段负载倍率

Fig.4 Load multiplier for each time period

表2 仿真参数设置情况

Tab.2 Simulation parameter settings

参数	设置情况
MCR 无功补偿量/Mvar	上限+0.5, 下限-0.5
电抗器无功补偿量/Mvar	上限 0, 下限-0.5, 单位变化量 0.02
变压器变比(标么值)	上限 1.025, 下限 0.985, 单位变化量 0.002
设备初始状态(标么值)	MCR 补偿量 0, 电抗器组补偿量 0, 变压器变比 1
设备动作限制	0.6 倍以上、下限差值
目标电压(标么值)	平衡节点为 1.04, 节点 18 与 33 为 1.025, 节点 6 与 23 为 1.01
目标函数权重	网损权重 0.572, 电压偏差权重 0.236, 无功设备动作成本权重 0.096, 变压器动作成本权重 0.096
优化算法参数	种群数 50, 最大迭代数 500

3.2 优化结果分析

以工作日电网运行状态进行分析,优化前由于光伏的有功功率注入、电缆线路的无功注入导致系统无功功率倒送,系统整体电压明显偏高。无功优化前、后各时段节点电压对比图如图 5 所示,未优化的电压曲面其整体位于电压幅值 1.0 之上,而经过动态无功优化后电网节点电压幅值

下降明显。表3给出了电缆线路接入的关键节点7,16,22,29的电压变化情况以及电压偏差变化率,由于电缆接入导致电压抬升过高,通过并联电抗器吸收无功功率,优化后各关键节点的电压偏差下降明显。图6给出了各节点优化前、后电压对比,其中节点16的电压超过上限值,利用电抗器优化无功功率,能够有效地平衡电压,节点29的偏差下降最明显,下降幅度达到84.4%,优化后平均电压接近于1.0。

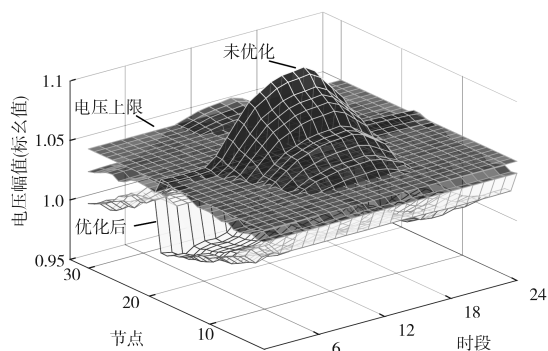


图5 各时段各节点电压对比

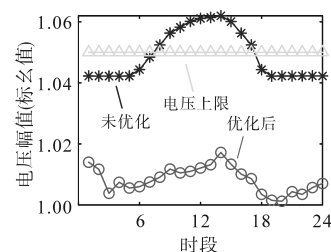
Fig.5 Comparison of voltage in each time period

表3 关键节点平均电压对比

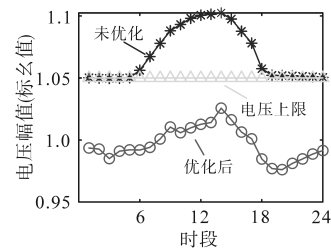
Tab.3 Average voltage comparison of key nodes

节点	优化前 平均电压(标么值)	优化后 平均电压(标么值)	电压偏差 减少率/%
7	1.049	1.008	83.1
16	1.069	0.997	83.3
22	1.042	1.019	54.6
29	1.041	1.002	84.4

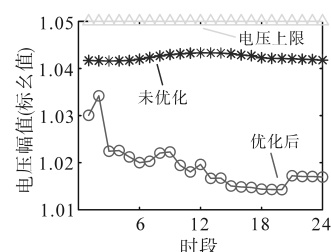
图7a展示了本文采用的多目标优化与目标为电压偏差的单目标优化结果的电压偏差对比,图7b展示了多目标优化与以网损为目标的单目标优化结果的网损对比。由图7a与图7b可以看出,本文提出的多目标优化方法能够综合考虑网损与电压偏差,在所有时段中优化后的网损较为接近单目标的网损结果,而在大部分时段电压偏差也仅略逊于单目标优化后的电压偏差。在维持网损较低的同时也能够保持较低的电压偏差。表4给出了优化前后系统的网损、电压偏差均值变化情况,其中优化后平均网损降低73.4%,平均电压偏差降低77.8%。可以看出,由于大量电缆以及分布式电源的接入,导致系统电压抬升过高致使系统网损较大,通过电抗器吸收无功功率平衡节点电压,减少无功功率的流动,有效降低了系统损耗。



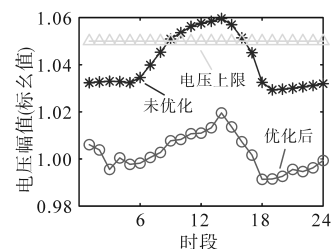
(a)节点7各时段优化前后电压



(b)节点16各时段优化前后电压



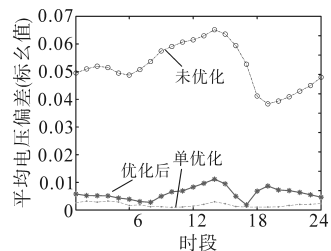
(c)节点22各时段优化前后电压



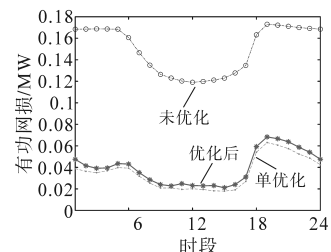
(d)节点29各时段优化前后电压

图6 关键节点电压对比

Fig.6 Comparison of key node voltages



(a)平均电压偏差



(b)有功网损

图7 各时段电压偏差、网损对比

Fig.7 Comparison of voltage deviation and power loss

表4 优化前后网损与电压偏差均值变化

Tab.4 Changes in the mean value of network loss and voltage deviation before and after optimization

参数	优化前均值	优化后均值	减少率
网损/MW	0.149	0.040	73.4%
电压偏差(标么值)	0.051	0.011	77.8%

图8给出了多目标优化和仅考虑网损的单目标优化结果对比。表5给出了多目标优化和网损单目标优化系统其他参数的变化情况,其中电压偏差均值从0.051降低为0.011,而仅以网损为单目标优化时电压偏差为仅从0.051降低为0.047,降幅较小。结合图8与图7b以及表5的数据,可以看出在综合考虑多目标时,有功损耗的变化基本一致,但因其同时考虑电压偏差、无功设备动作成本等因素,使得系统电压更加稳定,设备的动作次数更趋于合理。

表5 不同目标函数下电压偏差对比

Tab.5 Comparison of voltage deviation under different objective functions

目标函数	优化前平均 电压偏差(标么值)	优化后平均 电压偏差(标么值)	减少率/%
单目标	0.051	0.047	7.8
多目标	0.051	0.011	77.8

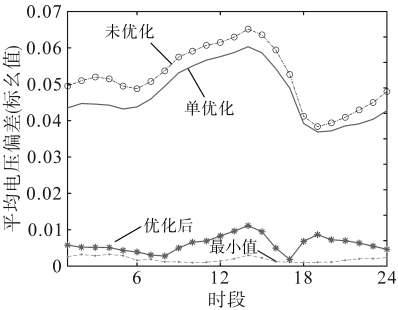


图8 多目标优化电压偏差对比

Fig.8 Comparison of voltage deviation multi-objective optimization

3.3 不同算法对比分析

为了验证本文算法的有效性和优越性,本文选择粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、教与学算法(TLBO)、平衡优化器算法(EO)和改进平衡优化器算法(IEO)进行无功优化计算对比分析。图9给出了不同算法在第1时段的优化迭代过程。与PSO,GA,TLBO算法对比,IEO在收敛性和收敛精度上都有不少的提升,且在迭代中后期能够跳出局部最优解,发现更优的解;与EO对比,IEO在收敛速度与收敛性上都有所提升。不同算法优化结果如表6所示,IEO算法相较于EO,PSO,GA,TLBO算法,优化后网损进一步降低1.4%,3.4%,6.5%与5.4%,电压偏差进一步降低

1.9%,3.9%,7.8%与6.7%。

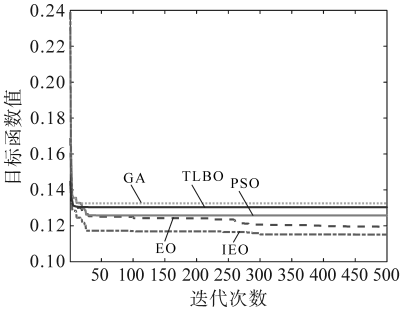


图9 算法改进前后收敛速度对比图

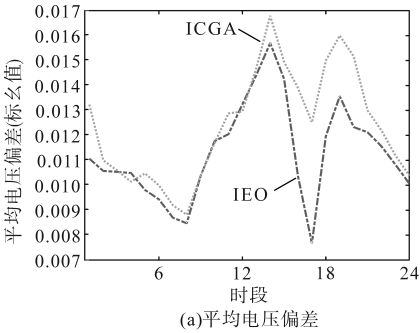
Fig.9 Comparison chart of convergence speed before and after algorithm improvement

表6 不同算法优化网损与电压偏差对比

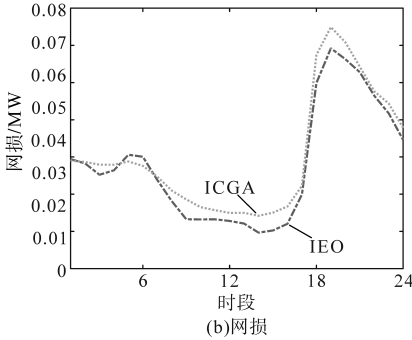
Tab.6 Comparison of power loss and voltage deviation between different algorithms

算法	网损减少率/%	电压偏差减少率 /%
PSO	69.8	74.5
EO	71.8	76.5
IEO	73.2	78.4
GA	66.7	70.6
TLBO	67.8	71.7

采用文献[20]的改进混合型遗传算法(ICGA)对本文优化模型进行求解,与本文的IEO进行对比。结果如图10所示,经过ICGA优化后系统的网损与经IEO优化后的值较为接近,略劣于IEO。时段13后开始IEO的电压偏差则远小于ICGA的结果。



(a)平均电压偏差



(b)网损

图10 ICGA与IEO优化后电压偏差与网损对比

Fig.10 Comparison of network loss and voltage deviation after ICGA and IEO optimization

4 结论

随着新能源发电的不断接入以及电力线路电缆化程度的不断提升,电网无功电压问题越来越突出。本文综合考虑电网网架结构,建立综合考虑有功、无功功率倒送的电网动态无功优化模型,该模型以系统网络损耗、电压偏差以及电抗器、变压器动作成本构建无功优化目标函数。同时,通过改进自适应生成概率、余弦平衡策略提升传统平衡优化器算法的收敛速度和精度,并利用其进行动态无功优化模型求解。最后,为了验证本文方法的有效性和合理性,通过改进的IEEE33节点系统进行仿真分析,结果显示本文方法能够有效提高电网无功电压控制能力,并与采用其他算法的结果对比分析,显示本文采用的优化算法具有收敛快、精度高的优点。

在电网无功优化调度的后续研究工作中,将继续深入研究源荷不确定性、储能、汽车充电桩等问题,为未来的电网提供适应更多场景的无功优化方案与策略。

参考文献

- [1] 薛霖,牛涛,方斯顿,等. 计及高比例风电暂态电压安全的主从协同动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 57-66.
XUE Lin, NIU Tao, FANG Sidun, et al. Master-slave cooperative dynamic reactive power optimization method considering transient voltage security of high proportion of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 57-66.
- [2] 符杨,武洁,苏向敬,等. 不平衡主动配电网电压无功两阶段多目标鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 79-87.
FU Yang, WU Jie, SU Xiangjing, et al. Two-stage multi-objective robust optimization of voltage/var for unbalanced active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 79-87.
- [3] 张杰,郑云耀,刘生春,等. 基于解耦内点法与混合整数规划法的区域电网动态无功优化算法[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 112-118.
ZHANG Jie, ZHENG Yunyao, LIU Shengchun, et al. A dynamic reactive power optimization algorithm for regional power grid based on decoupling interior point method and mixed integer programming method[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 112-118.
- [4] 孙浩锋,章健,熊壮壮,等. 含风光储联合发电系统的主动配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 104-110, 125.
SUN Haofeng, ZHANG Jian, XIONG Zhuangzhuang, et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic-energy storage hybrid generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 104-110, 125.
- [5] 储琳琳,李轶立,肖业凡,等. 基于混合蛙跳算法的配电网无功补偿双层优化[J]. 电器与能效管理技术, 2019(11): 62-66.
CHU Linlin, LI Yili, XIAO Yefan, et al. Bilevel optimization of reactive power compensation based on frog leaping algorithm[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(11): 62-66.
- [6] 黄留欣,黄磊,赵颖煜,等. 电力系统容性无功及补偿[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(3): 1-5.
HUANG Liuxin, HUANG Lei, ZHAO Yingyu, et al. Capacitive reactive power and compensation in power systems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(3): 1-5.
- [7] 张莹,陈洁,郭磊,等. 考虑柔性可控资源的主动配电网动态无功优化方法研究[J]. 电气自动化, 2023, 45(5): 30-33.
ZHANG Ying, CHEN Jie, GUO Lei, et al. Research on dynamic reactive power optimization method for active distribution networks considering flexible and controllable resources[J]. Electrical Automation, 2023, 45(5): 30-33.
- [8] 段友莲,戴林东,郑连清. 静止无功补偿器的优化配置方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 12-17.
DUAN Youlian, DAI Lindong, ZHENG Lianqing. Study on optimization configuration method of static var compensator[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 12-17.
- [9] 张剑,崔建明,何怡刚. 计及分时电价的电缆配电网多时段二阶段有功与无功协调快速鲁棒优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 94-100.
ZHANG Jian, CUI Mingjian, HE Yigang. Multi-period two-stage fast robust optimal dispatch method of active and reactive power coordination for cable distribution network considering time-of-use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 94-100.
- [10] 乔立同,汪挺,刘剑宁,等. 考虑源网荷储协调互动的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 146-151, 189.
QIAO Litong, WANG Ting, LIU Jianning, et al. Distribution network reactive optimization considering generation network load storage interaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 146-151, 189.
- [11] 罗天,汪可友,李国杰,等. 基于拉格朗日对偶松弛的多区域柔性直流互联电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 68-76.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grid based on Lagrangian dual relaxation[J]. Automation of Electric Systems, 2019, 43(11): 68-76.
- [12] 魏珊珊,高飞,俞嘉浩,等. 基于分布式拟牛顿法的交流微电网经济运行控制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 72-78, 128.
WEI Shanshan, GAO Fei, YU Jiahao, et al. Economic operation

(下转第54页)

- XU M R, LU S F, JI F, et al. Hierarchical peak shaving strategy of energy station in multi station fusion system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(4): 102-108.
- [14] 杨振南, 王延伟, 庞学跃, 等. 基于储能紧急有功支援策略对受端电网频率稳定性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 89-94.
- YANG Zhennan, WANG Yanwei, PANG Xueyue, et al. Influence of emergency active-power support strategy on frequency stability of power network at receiving end[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 89-94.
- [15] 朱宗耀, 王秀丽, 吴雄, 等. 复合储能参与电能量及辅助服务市场的运行策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 80-90.
- ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Operation strategy for composite energy storage participating in electric energy and ancillary service markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 80-90.
- [16] 曹明浩, 于继来. 滚动考核下的新能源场站-电池储能单元运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7079-7090.
- CAO Minghao, YU Jilai. Operation strategy of renewable energy and battery integrated unit under rolling assessment of generation schedule[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7079-7090.
- [17] 吴晗, 欧阳森, 梁炜焜. 计及储能循环寿命的柔性配电网优化运行及效益均衡策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 99-109.
- WU Han, OUYANG Sen, LIANG Weikun. Optimal operation and benefit balance strategy for flexible distribution network considering cycle life of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 99-109.
- [18] 李相俊, 马锐, 王上行, 等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 62-70.
- LI X J, MA R, WANG S X, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 62-70.
- [19] 王森, 李凤婷, 张高航, 等. 面向新能源高渗透系统调峰和调频的系统级储能容量需求分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 24-31.
- WANG Sen, LI Fengting, ZHANG Gaochang, et al. Capacity demand analysis of system-level energy storage for peak regulation and frequency regulation of power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 24-31.
- [20] ROGER K, KEVIN F Hallock. Quantile regression[J]. Journal of Economic Perspectives, 2001, 15(4): 143-156.
- [21] LI S, ZHAO P, GU C, et al. Aging mitigation for battery energy storage system in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(3): 2152-2163.

收稿日期: 2024-06-03

修改稿日期: 2024-09-11

(上接第44页)

- control of AC microgrids based on distributed quasi Newton method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 72-78, 128.
- [13] 黄伟, 刘斯亮, 羿应棋, 等. 基于光伏并网点电压优化的配电网多时间尺度趋优控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 92-100.
- HUANG Wei, LIU Siliang, YI Yingqi, et al. Multi-time-scale optimization control of distribution network based on photovoltaic grid voltage optimization[J]. Automation of Electric Systems, 2019, 43(3): 92-100.
- [14] 陈攀峰, 程浩忠, 吕佳炜, 等. 基于二阶锥规划考虑主动管理的主动配电网故障恢复[J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 46-51.
- CHEN Panfeng, CHENG Haozhong, LÜ Jiawei, et al. Fault recovery of active distribution network considering active management based on second-order cone programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 46-51.
- [15] SHANKAR Natarajan, SARAVANAKUMAR Natarajan, KUMAR Chandrasekaran, et al. Opposition-based equilibrium optimizer algorithm for identification of equivalent circuit parameters of various photovoltaic models[J]. Journal of Computational Electronics, 2021, 20(4): 1560-1587.
- [16] ABDEL-BASSET Mohamed, MOHAMED Reda, MIRJALILI Seyedali, et al. Solar photovoltaic parameter estimation using an improved equilibrium optimizer[J]. Solar Energy, 2020, 209(10): 694-708.
- [17] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, ABOUHAUWASH M. Balanced multi-objective optimization algorithm using improvement based reference points approach[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 60(1): 100791.
- [18] EI-SHORBAGY M A, MOUSA A A. Constrained multiobjective equilibrium optimizer algorithm for solving combined economic emission dispatch problem[J]. Complexity, 2021(1): 79.
- [19] 赵娟. 基于改进平衡优化器的电力系统最优潮流计算[J]. 宁夏电力, 2021(2): 1-7.
- ZHAO Juan. Optimal power flow calculation of the power system based on modified equilibrium optimizer[J]. Ningxia Electric Power, 2021(2): 1-7.
- [20] 易春磊, 柴良明, 王世友, 等. 基于改进型混沌遗传算法的农村配电网无功补偿研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 40-43.
- YI Chunlei, CHAI Liangming, WANG Shiyu, et al. Research on reactive power compensation of rural distribution network based on improved chaotic genetic algorithm[J]. Electrical Automation, 2022, 44(4): 40-43.

收稿日期: 2024-04-29

修改稿日期: 2024-07-28