

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0173-05

考虑电网损耗和电压稳定性的配电网综合节能规划算法

徐华泽, 黄霆, 袁健华, 钱凌寒

(国网江苏省电力有限公司南通供电分公司, 江苏南通 226000)

摘要:针对配电网节能规划中电网损耗与电压稳定性挑战日益凸显的问题,研究旨在提出一种能够兼顾降低网损与提升电压稳定性的综合节能规划算法。通过优化配电网的有功和无功功率协调控制,减少能量损耗并改善电压分布,以提高能源利用效率和供电可靠性。研究构建了以有功损耗最小化和电压偏差最小化为目标的储能优化模型,进而设计了一种综合考虑有功无功协调优化、并增强多种约束条件的节能规划算法。结果显示通过设计算法进行节能规划其控制误差的最小值和最大值分别为0.12、0.15证明了其控制功率输出方面稳定性和精确率较高。不同的干扰项下通过设计算法协调规划所耗费的时间范围为3~8s证明其提高了配电网协调规划的效率。以上结果证明了设计算法的有效性对于实现可持续能源发展和节能减排具有积极的促进作用。

关键词:配电网;电网损耗;电压稳定性;节能规划;模型;算法

中图分类号: TP181

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0173-05

Comprehensive energy-saving planning algorithm for distribution networks considering power grid losses and voltage stability

Xu Huaze, Huang Ting, Yuan Jianhua, Qian Linghan

(State Grid Nantong Power Supply Company, Nantong 226000, Jiangsu, China)

Abstract: Addressing the increasingly prominent challenges of grid losses and voltage stability in distribution network energy-saving planning, this study aims to propose a comprehensive energy-saving planning algorithm that can simultaneously reduce grid losses and improve voltage stability. By optimizing the coordinated control of active and reactive power in the distribution network, energy losses are reduced and voltage distribution is improved, thereby enhancing energy utilization efficiency and power supply reliability. This study constructs an energy storage optimization model with the objectives of minimizing active power losses and voltage deviations, and then designs an energy-saving planning algorithm that comprehensively considers the coordinated optimization of active and reactive power and enhances various constraints. The results show that the minimum and maximum control errors of energy-saving planning through the design algorithm are 0.12 and 0.15, respectively, proving its high stability and accuracy in controlling power output. Under different interference conditions, the time range for coordinating planning through the design algorithm is 3 s–8 s, proving that it improves the efficiency of distribution network coordination planning. The above results demonstrate the effectiveness of the design algorithm, which has a positive promoting effect on achieving sustainable energy development and energy conservation and emission reduction.

Keywords: distribution network; power grid losses; voltage stability; energy saving planning; model; algorithm

配电网作为现代社会生活和经济活动的动脉,其高效、稳定的运行对于保障能源供应和推动可持续发展具有举足轻重的意义。随着全球能源消费的不断增长,配电网作为连接电网与消费端的关键环节,其节能问题日益凸显,尤其是电网损耗和电压稳定性问题对节能效果有着直接影响^[1]。电网损耗不仅减少了能源供应效率,增加了能源消费成本,而且加剧了环境压力,对于实现绿色低碳发展构成挑战。同时,电压稳定性直接关系到电力系统的安全运行和电能质量,是保障用户设备正常工作和电力系统稳定运行的基本要求^[2]。传统的配电网规划多聚焦于成

本最小化,而未能充分考虑电网损耗和电压稳定性对整体能效的影响。因此,如何在保证电压稳定的前提下,进一步降低配电网的损耗,实现能源的高效利用,已成为亟待解决的问题。崔纪民等^[3]为了降低储能系统投资在微电网规划中的占比,从而平衡系统发电与需求响应负荷,提出一种联合优化储能容量配置、需求响应负荷和可再生能源消纳能力的微电网储能容量分布鲁棒配置模型,结果显示该系统可有效提高微电网调节需求的储能配置有效性。Tolba等^[4]为解决配电网面对高功率损耗和电压下降等问题,设计出一种基于取证的调查优化方法,其通过引入

收稿日期:2024-12-09;录用日期:2025-01-16

基金项目:江苏省国网科技项目(J2023100)

作者简介:徐华泽(1988—),男,硕士,高级工程师,研究方向:电气工程。

引用本文:徐华泽,黄霆,袁健华,等.考虑电网损耗和电压稳定性的配电网综合节能规划算法[J].自动化技术与应用,2026,45(6):173-177.(Xu Huaze, Huang Ting, Yuan Jianhua, et al. Comprehensive energy-saving planning algorithm for distribution networks considering power grid losses and voltage stability[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(6):173-177.)

层次分析法生成多目标函数的权重因子以最小化功率损耗和电压偏差,结果显示该方法稳定性较高。鉴于此,研究在配电网中通过有功无功协调优化,设计出一种综合节能规划算法,以提高配电网的稳定性和效率。

1 配电网综合节能规划算法设计

1.1 计及网损电压稳定的储能优化

在配电网中,电能的传输过程中会发生一定的能量损耗,被称为网损。这种网损不仅会导致电能的浪费,还可能对供电质量和设备寿命产生不利影响^[5-6]。同时,电压的稳定性对于保证供电质量和设备运行也具有重要影响。因此,在配电网的综合节能规划中,考虑减少网损和维持电压的稳定非常关键。为了实现这一目标,研究在配电网中接入储能装置设计出一种优化模型,用于综合考虑网损和电压稳定性,以确定最佳的储能配置和运行策略,实现配电网的节能优化。储能优化模型技术实现如图1所示。

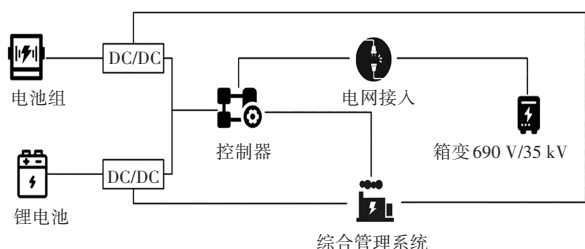


图1 储能优化模型技术实现过程

Fig. 1 Implementation process of energy storage optimization model technology

通过储能装置的调度,可以降低电网的网损,提高电能利用效率^[7]。同时,储能装置作为电网的缓冲器,能够平衡电网供需的能量差异,增强电网的稳定性和可靠性。此外,储能装置还能根据电网负荷波动情况进行调峰填谷,减少负荷波动,优化电网负荷曲线^[8]。综上所述,配电网接入储能装置可提高能源利用效率,减少能源浪费,并提供更稳定可靠的供电服务。在接入储能装置之前,配电网的系统电路损耗如式(1)所示。

$$P_b = \frac{R_L(P_m^2 + Q_m^2)}{3U_L^2} \quad (1)$$

式中, P_b 代表未接入储能装置时的电路损耗, R_L 代表线路等效电阻, P_m 代表有功负荷, Q_m 代表无功负荷, U_L 代表相电压。接入储能装置之后,当负荷需要电能时,其会释放电流并向负荷方向单向流动,电流计算公式如式(2)所示。

$$I_o = \frac{P_o - jQ_o}{3U_L} \quad (2)$$

式中, I_o 代表储能装置流向负荷的单向电流, P_o 代表储能装置输出的有功功率,即其向负载或电网供应的实际功率, j 代表虚数单位, Q_o 代表储能装置输出的无功功率,即其向负载或电网提供的无实际能量转化的功率。下一步即可计算出电能传输到储能装置接入点所产生的能量损

失,即有功损耗,计算方法见式(3)。

$$P_{AL} = \frac{R_{Lf}(P_m^2 + Q_m^2 + P_o - 2P_mP_o - 2Q_mQ_o)}{3U_L^2} \quad (3)$$

式中, R_{Lf} 代表配电网系统与储能装置之间的等效电阻。下一步可以计算出储能装置向负荷节点输送电能的过程中产生的能量损耗,计算方法见式(4)。

$$P_{LB} = \frac{R_{LB}(P_m^2 + Q_m^2)}{3U_L^2} \quad (4)$$

式中, R_{LB} 代表储能装置的接入点与负荷之间的等效电阻。根据电能传输到储能装置接入点所产生的能量损失与储能装置向负荷节点输出电能过程中产生的能量损耗即可计算出接入储能装置后的总有功损耗,其计算方法如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_L = \frac{R_L[P_m^2 + Q_m^2 + a(P_o^2 + Q_o^2 - 2P_mP_o - 2Q_mQ_o)]}{3U_L^2} \\ a = \frac{R_{Lf}}{R_{LB}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, a 代表储能装置在配电网中接入的位置。有功损耗是电力系统中不可避免的能量损耗,其包括输电线路、变压器、开关设备以及其他电路元件等引起的能量损耗^[9]。这些损耗会导致电能的浪费和系统效率的降低。因此,研究通过优化系统的有功损耗分布,建立目标函数以最小化系统的有功损耗,从而有效控制系统的有功损耗,并提高电力系统的效能和能源利用率。目标函数表达式如式(6)所示。

$$\max(P_L) = \frac{R_L(2P_mP_o + 2Q_mQ_o - P_o^2 - Q_o^2)}{3U_L^2} \quad (6)$$

式中, $\max(P_L)$ 代表目标函数。同时,在配电网的综合节能规划中,除了考虑降低网损外,还需考虑电压偏移。电压偏移是指电网中节点电压与其额定值之间的差异。若电压偏移过大,会导致负荷电器工作不稳定甚至损坏,同时影响电能计量的准确性^[10]。研究选择日均电压偏差作为评估标准,并每小时对各节点电压进行一次采样,然后计算每个节点的电压偏差的平方,并求和构建电压评估函数,具体计算方法见式(7)。

$$\begin{cases} \min(F) = \sum_{t=0}^t \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_i^*}{\Delta U_{i,\max}} \right)^2 \right) \\ \Delta U_{i,\max} = U_{i,\max} - U_{i,\min} \end{cases} \quad (7)$$

式中, t 代表取样时间, N 代表节点数量, U_i 代表第 i 个节点的电压值, U_i^* 代表第 i 个节点的参考电压, $\Delta U_{i,\max}$ 代表第 i 个节点的最大允许电压偏差, $U_{i,\max}$ 代表第 i 个节点的电压最大值, $U_{i,\min}$ 代表第 i 个节点的电压最小值。综上所述,通过优化储能装置的接入和调度,可以减少网损和保持电压稳定性,提高能源利用效率和供电质量。

1.2 网损电压稳定的协调优化模型

在确立了考虑网损与电压稳定的配电网储能优化目标后,接下来需构建相应的规划模型以实现这一目标。传

统的配电网规划方法中,规划者往往侧重于确保有功功率的供应,以满足日益增长的负荷需求。但是这一做法忽略了无功功率对电网稳定性的影响,特别是在维持电压水平和减小线路损耗方面^[11-12]。同时,由于无功功率对于传输距离的敏感性,其在远距离传输过程中的损耗也被相对忽略。因此研究通过对配电网的有功功率和无功功率协调控制,以实现综合节能规划。采用的配电网拓扑结构如图2所示。

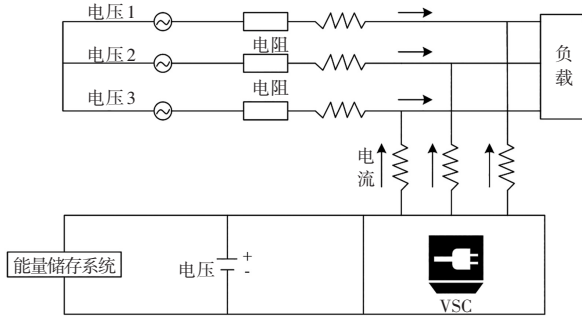


图2 配电网拓扑结构

Fig.2 Distribution network topology

首先以配电网能源、网损以及电压偏差为目标函数,表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \max F(D) = \frac{\sum P_D}{P_n + \sum P_D} \\ \min F(L) = \frac{\sum P_D + P_n + P_L}{P_n + \sum P_D} \\ \min F(U) = \sum_i^n \frac{|U_i - U_{i,N}|}{U_{i,max} - U_{i,min}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\max F(D)$ 代表配电网能源最大值, $\min F(L)$ 代表配电网损耗的最小值, $\min F(U)$ 代表电压偏差最小值, $\sum P_D$ 代表配电网发电的有功之和, P 代表节点向配电网输送的有功功率, $U_{i,N}$ 代表第 i 个节点的额定电压。为了限制规划模型的解空间,确保解满足实际配电网的运行限制、网络拓扑结构和资源可用性等约束,以实现综合节能规划的目标,需要定义各目标函数的约束条件。因此,然后进行有功无功的约束,约束条件如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{i,p} + \sum_{j \in i} (P_j - r_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}) = \sum_{i \in i} P_i + \sum P_{i,l} \\ Q_{i,D} + \sum_{j \in i} (Q_j - x_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}) = \sum_{i \in i} Q_i + \sum Q_{i,l} \\ P_{i,p} = P_{i,D} + P_{i,o} \\ U_j^2 = \frac{[U_i^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)](P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)}{U_i^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{i,p}$ 代表配电网从第 i 个节点注入的有功功率总和, $Q_{i,D}$ 代表配电网中第 i 个节点的无功功率输入总量, r_{ij} 代表线路 ij 的电阻, $j \in i$ 代表第 i 个节点的上游节点集, $i \in$

i 代表第 i 个节点的所有下级节点, x_{ij} 代表第 i 个节点与第 j 个节点之间的线路功率流。通过有功无功约束可以确保配电网的有功和无功功率在合理范围内,并实现电网的稳定运行和优化调度。下一步进行输送功率的约束,约束条件如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{n,min} \leq P_n \leq P_{n,max} \\ Q_{n,min} \leq Q_n \leq Q_{n,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{n,min}$ 代表配电网向根节点输送的有功功率最小值, $P_{n,max}$ 代表配电网向根节点输送的有功功率最大值, $Q_{n,min}$ 代表配电网向根节点输送的无功功率最小值, $Q_{n,max}$ 代表配电网向根节点输送的无功功率最大值。通过合理约束输送功率,从而保护设备、防止过载。接着进行配电网系统中节点的电压与电流的约束,以确保电网的安全运行和电器设备的正常工作,计算方法如式(11)所示。

$$\begin{cases} U_i(\min) \leq U_i \leq U_i(\max) \\ I_i \leq I_i(\max) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $U_i(\min)$ 代表第 i 个节点允许的最小电压, $U_i(\max)$ 代表第 i 个节点允许的最大电压, I_i 代表第 i 个节点的电流, $I_i(\max)$ 代表节点允许通过的最大电流。下一步进行储能装置的调控进行约束,以确保储能装置的安全性、稳定性和性能优化,以从而保障电力系统的可靠运行。约束条件如式(12)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,c} \leq P_{i,c}(\max) \cdot D_{i,c} \\ 0 \leq P_{i,e} \leq P_{i,e}(\max) \cdot D_{i,e} \\ D_{i,c} + D_{i,e} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $P_{i,c}$ 代表某一时刻第 i 个节点的充电功率, $P_{i,e}$ 代表某一时刻第 i 个节点的放电功率, $P_{i,c}(\max)$ 代表节点充电功率的最大值, $P_{i,c}(\min)$ 代表节点充电功率的最小值, $D_{i,c}$ 代表充电时的状态变量, $D_{i,e}$ 代表放电时的状态变量。下一步进行静止无功补偿器的调控约束,约束条件如式(13)所示。

$$Q_{i,s}(\min) \leq Q_{i,s} \leq Q_{i,s}(\max) \quad (13)$$

式中, $Q_{i,s}$ 代表第 i 个节点上的静止无功补偿器无功出力, $Q_{i,s}(\min)$ 代表节点上的静止无功补偿器无功出力最小值, $Q_{i,s}(\max)$ 代表节点上的静止无功补偿器无功出力最大值。通过静止无功功率补偿器的调控约束,即可实现无功功率补偿和电压调节。最后进行配电网断路器的投切约束,约束条件如式(14)所示。

$$\begin{cases} Q_{i,c} = \gamma \Delta Q_{i,v,c} \\ m \Delta Q_{i,v,c} = Q_{i,c}(\max) \end{cases}, \gamma = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式中, $Q_{i,c}$ 代表第 i 个节点在某一时刻电容器释放的无功功率, γ 代表投切的组数, $\Delta Q_{i,v,c}$ 代表单组投切量, m 代表投切组数的最大值, $Q_{i,c}(\max)$ 代表第 i 个节点断路器容量最大值。通过该节能规划模型优化储能装置的接入和调度,以及有功无功功率的协调控制,可以最小化系统的有功损耗和电压偏差,并提高电力系统的效能和能源利用率。

2 节能规划模型结果分析

为验证设计的配电网综合节能规划算法的性能,研究

在运行内存为 16 GB,64 GB 的磁盘空间,图形处理单元为 GTX 1080Ti, Tensorflow 框架下进行仿真分析。首先分别

计算出优化前和优化后根节点在一天之内的有功功率和无功功率,对比结果如图 3 所示。

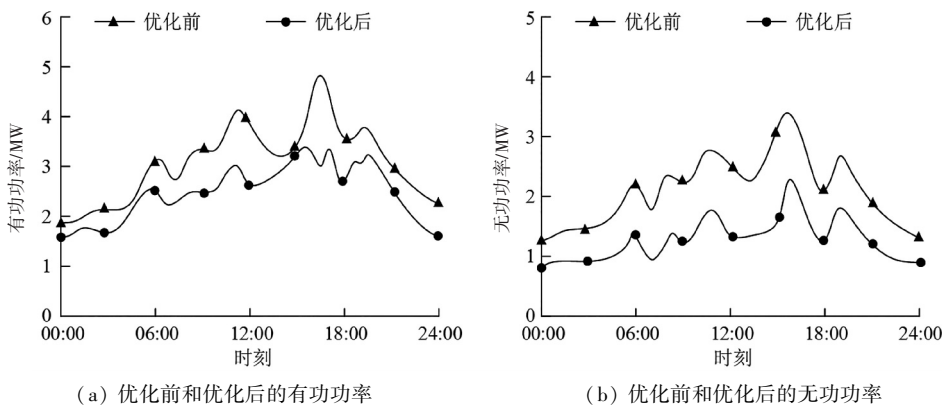


图 3 优化前和优化后根节点的有功功率和无功功率

Fig. 3 Active and reactive power of the root node before and after optimization

从图 3(a)中可以看出,在一天之中,优化前配电网的有功功率随时间的变化范围在 1.8~4.8 MW 之间。优化后配电网的有功功率随时间的变化范围在 1.6~3.3 MW 之间。从图 3(b)中可以看出,优化前配电网的无功功率随时间的变化范围在 1.3~3.4 MW 之间,优化后配电网的无功功率随时间的变化范围在 0.8~2.3 MW 之间。可以发现,设计的综合节能规划算法能够有效降低有功和无功功率,这表明优化后的配电网在供电负荷平衡方面有了显著的改善,证明该算法能够提高电源的利用率。下一步分别计算优化前和优化后的网络损耗与网络最低电压值,对比结果如图 4 所示。

小值为 0.12 MW,最大值为 0.22 MW。优化后配电网的网络损耗最小值为 0.10 MW,最大值为 0.20 MW。从图 4 (b)中可以看出,优化前配电网的节点最低电压值最小为 0.952 p. n.,最大为 1.026 p. n.。优化后配电网的节点最低电压值最小为 0.958p. n.,最大为 1.009 p. n.。优化后,配电网的能量损耗明显减少,并且节点最低电压的范围减小。说明通过设计的综合节能规划算法优化配电网后,能量的传输和分配更加高效,减少了能源浪费,提高了系统的能效性能。同时,节点的电压水平更接近额定值,提高了配电网的电压稳定性。下一步在不同的干扰项下,计算基于设计算法的配电网协调规划所耗费的时间,并与未优化之前进行比较,对比结果散点图如图 5 所示。

从图 4(a)中可以看出,优化前配电网的网络损耗最

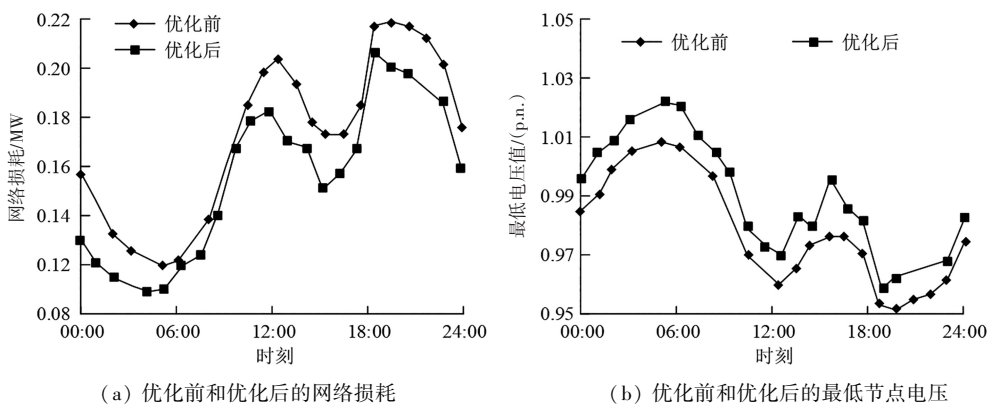


图 4 优化前和优化后的网络损耗与网络最低节点电压

Fig. 4 Network loss and minimum node voltage before and after optimization

从图 5(a)中可以看出,在进行有功无功协调优化之前,在不同的干扰项下,配电网协调规划所耗费的时间最小值约为 7 s,最大值约为 20 s。从图 5(b)中可以看出,在进行有功无功协调优化之后,在不同的干扰项下,配电网协调规划所耗费的时间最小值与最大值分别约为 3、8 s。以上结果表明通过综合节能规划算法的优化,配电网协调规划所耗费的时间得到了明显的降低,提高了配电网协调规划的效率。最后研究通过比较配电网的总输出

功率和配电网的实际输出功率,分别计算优化前和优化后的控制误差,对比结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,随着时间的变化,优化前配电网的控制误差最小值为 0.18 p. u.,控制误差最大值为 0.39 p. u.。优化后,配电网有功无功协调优化控制误差的最小值和最大值分别为 0.12、0.15 p. u.。可以发现,优化后的配电网的控制误差范围相比优化前有所减小,说明优化后的配电网在控制功率输出方面表现更加稳定和精确,能够更好地满足用户的

用电需求。

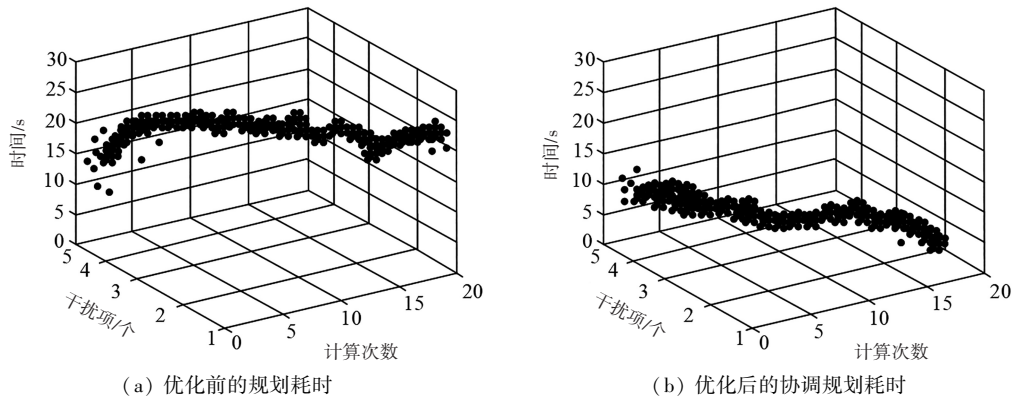


图5 优化前和优化后配电网协调规划所耗费的时间
Fig. 5 Time spent on distribution network coordination planning before and after optimization

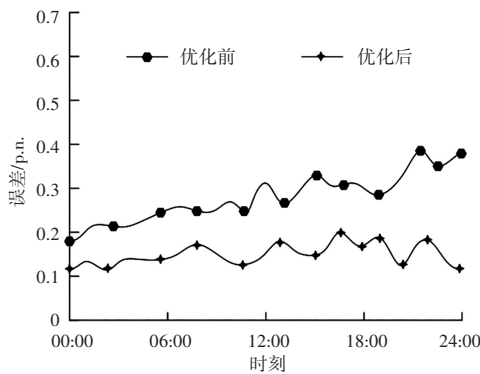


图6 优化前和优化后配电网的控制误差对比
Fig. 6 Comparison of control errors of the distribution network before and after optimization

3 结论

在电力系统规划与管理中,节电与稳压是提升配电网运行效益的关键因素。为形成一套综合节能与电压稳定考量的配电网规划算法,以优化配电网效能。研究通过有功无功协调优化,设计出一种综合节能规划算法,以减少运行时间,并通过增强约束以降低错误。结果表明配电网协调规划所耗费的时间经优化后显著降低,有功无功协调优化后时间耗费最小为3 s,最大为8 s,与原状态相比效率提升显著。优化后配电网的网络损耗最小值为0.10 WM,最大值为0.20 WM,说明设计算法能够提升能源的利用率。但是研究结果仍有待在多样化的电网环境中进一步验证,其局限性表现在算法的适用范围与变量条件的多样性。未来研究将关注算法针对更广泛电网环境的应用可能性,并继续优化算法的通用性与抗干扰能力。

参考文献

[1] 李练兵, 张凯宁, 曾四鸣, 等. 基于 APDE 算法的配电网分布式电源承载力评估[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11):55-63.

[2] 闫丽梅, 赵奕岚, 赵书琪. 基于改进人工蜂鸟算法的微电网优化调度[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(03):177-185.

[3] 崔纪民, 杨素民, 张栋生, 等. 需求响应下的微电网储能容量分布鲁棒规划方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):54-58.

[4] Tolba M A, Houssein E H, Eisa A A, et al. Optimizing the distributed generators integration in electrical distribution networks; Efficient modified forensic-based investigation [J]. Neural Computing and Applications, 2023, 35(11):8307-8342.

[5] 王光增, 华献宏, 柴志华, 等. 基于改进型蚁群算法实现配电网无功功率最佳补偿点分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2):207-211.

[6] 朱建昆, 高红均, 贺帅佳, 等. 考虑 VSC 与光-储-充协同配置的交直流混合配电网规划[J]. 智慧电力, 2023, 51(11):7-14.

[7] 岳宝强, 袁森, 彭静, 等. 基于自然语言处理技术的智能配电网调度优化方法研究 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(11):55-59.

[8] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21):12-21.

[9] Knapp H, Romagnoli G. RFID systems optimisation through the use of a new RFID network planning algorithm to support the design of receiving gates [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2023, 34(3):1389-1407.

[10] 杨欣, 施天成, 吴晓鸣, 等. 平衡约束下的光伏并网复合储能自动规划系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):150-154.

[11] 付林, 彭珍, 郭文斌. 考虑系统频率响应特征的配电网综合优化规划[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(3):117-119.

[12] 乐健, 郎红科, 廖小兵, 等. 基于广义线性多面体的有源配电网仿射可调鲁棒优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22):138-148.