

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250349

基于电动汽车-光伏协同调度的三相配电网最优谐波潮流

邓诗扬, 周群, 马晓阳

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 配电网中谐波失真问题日趋严峻。然而, 目前谐波治理的有关研究通常只聚焦于单一设备的谐波抑制, 忽略了设备间的协同优化, 导致谐波治理存在效率有限、经济性不足的问题。因此, 提出一种三相不平衡配电系统中电动汽车与光伏协同调度的多目标最优谐波潮流模型, 在减小功率损耗与电压不平衡度的同时降低谐波失真度。然而, 谐波变量的引入会增加非凸模型的收敛难度。为了解决该问题, 将原最优谐波潮流模型解耦为最优潮流子模型与二次规划子模型, 并利用交替优化的思想实现模型的快速求解。最后利用 IEEE34 节点系统与 IEEE123 节点系统验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电系统; 光伏集成; 电动汽车并网; 电能质量补偿; 最优潮流

Optimal harmonic power flow in three-phase distribution networks based on EV-PV cooperative scheduling

DENG Shiyang, ZHOU Qun, MA Xiaoyang

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Harmonic distortion in distribution networks is becoming increasingly severe. However, existing studies on harmonic mitigation typically focus on harmonic suppression from individual devices, neglecting coordinated optimization among multiple devices. This results in limited effectiveness and insufficient economic performance of harmonic mitigation strategies. To address this issue, a multi-objective optimal harmonic power flow model for three-phase unbalanced distribution systems based on collaborative scheduling of photovoltaic (PV) systems and electric vehicles (EV) is proposed. The model reduces power losses and voltage unbalance while simultaneously lowering harmonic distortion. However, the introduction of harmonic variables increases the convergence difficulty of the non-convex model. To overcome this challenge, the original optimal harmonic power flow model is decomposed into an optimal power flow sub-model and a quadratic programming sub-model, and an alternating optimization approach is employed to achieve fast and efficient solution. Finally, the efficacy of the proposed methodology is verified using the IEEE 34-bus and IEEE 123-bus systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107117).

Key words: distribution system; photovoltaic integration; electric vehicle grid connection; power quality compensation; optimal power flow

0 引言

配电网中谐波失真问题日益凸显^[1-4], 在极端情况下, 谐波失真度高达 50%^[5]。谐波不仅会产生额外的功率损失、加速设备老化, 还会导致敏感设备误动或拒动、造成新能源脱网。当谐波含量超出安全范围时, 甚至会诱发严重事故, 如某风电场的风电机组燃烧事件以及 CRH380 系列动车组的谐振故

障, 这些事件均给经济带来了重大损失。因此, 对于配电系统运营商(distribution system operator, DSO)而言, 降低配电网中的谐波含量具有双重意义: 一方面可以延长配电网设备的寿命, 减少运维成本; 另一方面, 能够更好地满足特殊用户对电能质量的需求。

目前针对谐波治理的研究已经取得显著进展, 常见的谐波治理方式可以分为两类^[6]: 第一类运用定制电源技术, 如有源滤波器、无源滤波器等设备, 产生与谐波源方向相反的补偿信号来抵消谐波影响^[7-10]; 另一类通过在逆变器控制系统中引入前馈

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107117)

控制的方式来抑制谐波^[11-14]。

然而，上述方法主要聚焦于单一设备谐波电流输出的抑制，没有考虑设备间的协同优化。随着电网结构的转型与升级，接入配电网的谐波源数量持续攀升，若继续采取对各谐波源独立治理的策略，不仅效率低下，而且成本高昂。因此，为了有效提升配电网的电能质量，深入研究谐波补偿装置间的协同优化显得尤为重要。将谐波变量纳入最优潮流(optimal power flow, OPF)问题对于提升谐波治理效率具有非常重要的意义。对于 OPF 问题，需要从 OPF 模型的建立与求解两个方面去考虑。

在构建模型的过程中，需要合理选择补偿设备。电动汽车(electric vehicle, EV)与光伏(photovoltaic, PV)的并网逆变器可以通过改变控制系统设计，在不影响并网功能的基础上融合电能质量治理功能^[15]，不仅可以控制能量交换、进行无功补偿，还能在特定指令下产生不同频率、幅值、相位的谐波电流，提升电能质量水平^[6]。目前已有大量研究证明了 EV-PV 协同调度在缓解电压不平衡^[16]、减小电压偏差^[17-18]与降低功率损耗^[19-21]上的有效性。同时，针对 EV 与 PV 高渗透率并存的配电网场景，利用其现有的逆变器接口进行电能质量补偿，不需要接入额外的治理设备，在经济性上具有显著优势。

对于 OPF 问题的求解，常用的一类方法是将非凸的潮流模型进行凸化。例如将潮流模型线性化为直流 OPF^[22-23]、将总线注入模型松弛为半定规划(semidefinite programming, SDP)模型^[24-25]、将分支流模型松弛为二阶锥规划模型^[26-27]等。这类方法在最优基波潮流求解中的应用已经基本成熟，但在最优谐波潮流(optimal harmonic power flow, OHPF)中的研究仍然相对匮乏。文献[28]基于广义 Benders 分解理论将 OHPF 模型分解为主问题和凸的子问题求解。主问题确定变压器抽头离散变量，若干子问题分别求解基波与谐波潮流。但这种方法需要模型中存在离散变量。文献[29]将 OHPF 模型转化为 SDP 模型并求解，但 SDP 模型的松弛解在某些情境下不能满足原问题的约束条件，因此可能不可行。

另一种广泛采用的 OPF 模型求解途径是利用启发式算法，如 JAYA 算法^[30]、灰狼优化算法^[31]、深度神经网络方法^[32]等。这些启发式算法不仅能有效处理最优基波潮流模型，而且在求解 OHPF 模型时也展现出良好的性能。文献[33]使用灰狼优化算法、文献[6]使用加速粒子群算法来求解 OHPF 模型。但这种启发式算法缺乏最优性与可行性的保证，同时计算复杂度高^[34]。

针对上述问题，本文对基于 EV-PV 协同调度的

OHPF 优化方法进行了研究。本文的主要贡献如下。

1) 将谐波变量纳入 OPF 问题是必要的。因此，本文提出一个同时考虑基波与谐波的多目标 OPF 模型，利用 EV-PV 协同调度来缓解 PV、EV 高渗透率系统的电能质量问题。该模型以电压不平衡度、功率损耗、谐波失真度最小为优化目标。

2) 针对 OHPF 模型求解困难的问题，本文提出一种在基波与谐波之间进行交替优化的方法。将本文提出的 OHPF 模型解耦成最优基波潮流模型与二次规划模型进行交替迭代，从而快速求解。

1 EV-PV 协同调度优化模型

为了得到最优的 EV-PV 协同调度方案，本节首先阐述了所研究系统的结构，然后明确了优化目标，最后对相关约束进行了说明。

1.1 系统阐述

本文的研究场景为包含屋顶 PV、EV 充电设施与其他非线性负载的三相不平衡住宅配电网系统。利用 PV 逆变器与 EV 充电器的可控性，可以实现有功调节与无功补偿，并抑制系统中的其他非线性负荷带来的谐波污染。

基于此，本文构建了一个结构如图 1 所示的 EV-PV 协同调度系统。以某一相为例，控制中心从系统中收集光伏阵列瞬时输出功率、EV 初始电池电量等信息，并从外部收集其他相关信息(如根据 EV 车主签订的充放电合约计算的最大电量，最小电量等)。随后控制中心利用上述信息求解 OHPF 模型，并将基波有功功率 P_{ref} 、基波无功功率 Q_{ref} 、直流电压 $U_{dc,ref}$ 和谐波电流 I_{ref}^h 参考信号发送给控制器，由控制器执行这些优化结果，从而实现 PV 与 EV 协同调度的电能质量优化。

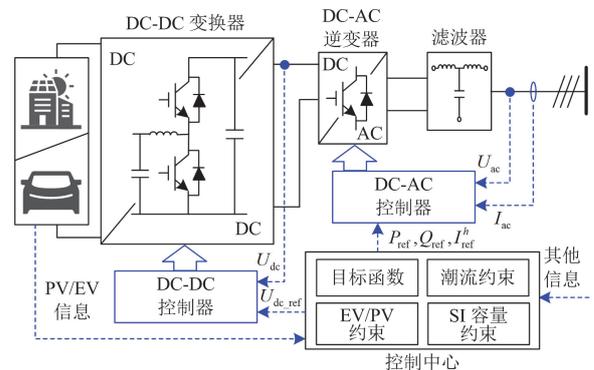


图 1 EV-PV 协同调度优化系统

Fig. 1 EV-PV cooperative scheduling optimization system

其中，直流-交流逆变器的控制框图如图 2 所示，采用多比例谐振控制器来跟踪不同频率的电流

参考信号。

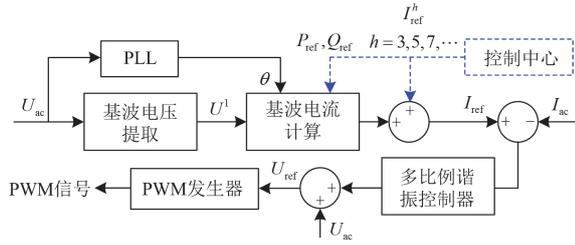


图2 直流-交流逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of the DC-AC converter

本文假设接入电网的PV、EV用户均签订合同，允许DSO在特定规则下对其充放电活动进行调整，并且DSO将为这些用户提供一定的经济补偿。

1.2 优化目标

本模型的优化目标为提升EV-PV高渗透率系统的电能质量。因此，该模型的优化目标包括配电网谐波失真的程度、电压不平衡的程度以及运行过程中的功率损耗。

电压总谐波失真度 f_{THD} 的定义为电压谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比^[35]。由于电压总谐波失真度与谐波电压近似成正比^[29]，为降低计算复杂度，将其简化为

$$f_{\text{THD}} = \sum_{h=3}^H \sum_{i=1}^N \sum_{\varphi=a,b,c} \left[(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2 \right] \quad (1)$$

式中： H 为本文研究的最大谐波阶数； N 为配电网的总节点数； $V_{i,\varphi,x}^h$ 、 $V_{i,\varphi,y}^h$ 分别表示第 i 个节点 φ 相的第 h 次谐波电压的实部、虚部。

电压不平衡度 f_{PVUR} 的定义为三相电压的负序分量与正序分量之比^[36]。由于基波正序电压远大于负序电压，电压不平衡度与负序电压近似成比例^[29]。因此，使用负序电压来反映电压不平衡度，并将其转化为直角坐标系形式，如式(2)所示。

$$f_{\text{PVUR}} = \sum_{i=1}^N \left[(V_{i,x}\beta - V_{i,y}\alpha)^2 + (V_{i,x}\alpha + V_{i,y}\beta)^2 \right] \quad (2)$$

式中： $V_{i,x}$ 、 $V_{i,y}$ 分别表示第 i 个节点的三相基波电压的实部、虚部组成的行向量； α 、 β 分别表示由 0 、 $4\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 的正弦函数、余弦函数组成的列向量。

配电网的功率损耗 f_{PL} 包括基波功率损耗和谐波功率损耗，如式(3)所示。

$$f_{\text{PL}} = f_{\text{PL}}^1 + \sum_{h=3}^H f_{\text{PL}}^h \quad (3)$$

式中： f_{PL}^1 表示基波功率损耗，其计算方式如式(4)所示； f_{PL}^h 表示第 h 次谐波功率损耗，通过各节点注入谐波有功功率之和计算，如式(5)所示。

$$f_{\text{PL}}^1 = \sum_{i=1}^N \sum_{\varphi=a,b,c} (P_{i,\varphi}^{\text{G},1} + P_{i,\varphi}^{\text{PV},1} - P_{i,\varphi}^{\text{EV},1} - P_{i,\varphi}^{\text{L},1}) \quad (4)$$

$$f_{\text{PL}}^h = \sum_{i=1}^N \sum_{\varphi=a,b,c} \left[V_{i,\varphi,x}^h \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h - B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h) \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{\varphi=a,b,c} \left[V_{i,\varphi,y}^h \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h + G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h) \right], \quad \forall i, j \in l \quad (5)$$

式中： $P_{i,\varphi}^{\text{G},1}$ 、 $P_{i,\varphi}^{\text{PV},1}$ 、 $P_{i,\varphi}^{\text{EV},1}$ 、 $P_{i,\varphi}^{\text{L},1}$ 分别表示第 i 个节点 φ 相的基波发电站输出有功功率、光伏发电有功功率、电动汽车充放电有功功率与其他负荷有功功率；需要注意的是，当 $P_{i,\varphi}^{\text{EV},1}$ 为正数时，表示电动汽车充电，反之，表示电动汽车放电； $G_{ij,\varphi\psi}^h$ 、 $B_{ij,\varphi\psi}^h$ 分别表示第 i 个节点 φ 相与第 j 个节点 ψ 相之间的第 h 次谐波电导、电纳； l 表示配电网线路集合。需要特别说明的是，导体的趋肤效应会导致其等效阻抗呈现显著的频变特性，因此，需根据不同谐波次数对应的频率对线路导纳参数进行修正。

1.3 约束条件

配电网运行需要满足一定的潮流约束，如式(6)所列的电压约束与式(7)、式(8)所列的基波功率平衡方程。

$$(V_{\min})^2 \leq (V_{i,\varphi,x}^1)^2 + (V_{i,\varphi,y}^1)^2 \leq (V_{\max})^2 \quad (6)$$

$$P_{i,\varphi}^{\text{NL},1} + P_{i,\varphi}^{\text{EV},1} + P_{i,\varphi}^{\text{L},1} - P_{i,\varphi}^{\text{PV},1} - P_{i,\varphi}^{\text{G},1} = 0 \quad (7)$$

$$Q_{i,\varphi}^{\text{NL},1} + Q_{i,\varphi}^{\text{EV},1} + Q_{i,\varphi}^{\text{L},1} + Q_{i,\varphi}^{\text{PV},1} + Q_{i,\varphi}^{\text{G},1} = 0 \quad (8)$$

式中： V_{\max} 、 V_{\min} 分别为电压上、下限； $P_{i,\varphi}^{\text{NL},1}$ 、 $Q_{i,\varphi}^{\text{NL},1}$ 分别为基波节点注入有功功率、无功功率； $Q_{i,\varphi}^{\text{G},1}$ 、 $Q_{i,\varphi}^{\text{PV},1}$ 、 $Q_{i,\varphi}^{\text{EV},1}$ 分别表示第 i 个节点 φ 相的发电站、光伏、电动汽车向系统注入的基波无功功率； $Q_{i,\varphi}^{\text{L},1}$ 表示其他负荷无功功率。 $P_{i,\varphi}^{\text{NL},1}$ 、 $Q_{i,\varphi}^{\text{NL},1}$ 的计算公式分别为

$$P_{i,\varphi}^{\text{NL},1} = V_{i,\varphi,x}^1 \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (G_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,x}^1 - B_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,y}^1) + V_{i,\varphi,y}^1 \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (B_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,x}^1 + G_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,y}^1), \quad \forall i, j \in l \quad (9)$$

$$Q_{i,\varphi}^{\text{NL},1} = V_{i,\varphi,y}^1 \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (G_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,x}^1 - B_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,y}^1) - V_{i,\varphi,x}^1 \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (B_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,x}^1 + G_{ij,\varphi\psi}^1 V_{j,\psi,y}^1), \quad \forall i, j \in l \quad (10)$$

除以上的基波功率平衡约束外，谐波电流还应

该满足形如 $I_{i,\varphi,x}^{NL,h} + I_{i,\varphi,x}^{PV,h} + I_{i,\varphi,x}^{EV,h} + I_{i,\varphi,x}^L = 0$ 、 $I_{i,\varphi,y}^{NL,h} + I_{i,\varphi,y}^{PV,h} + I_{i,\varphi,y}^{EV,h} + I_{i,\varphi,y}^L = 0$ 的电流平衡约束。其中： $I_{i,\varphi,x}^{PV,h}$ 、 $I_{i,\varphi,x}^{EV,h}$ 、 $I_{i,\varphi,x}^{NL,h}$ 、 $I_{i,\varphi,x}^L$ 分别表示第 i 个节点 φ 相的光伏、电动汽车与其他负荷注入电流的第 h 次谐波的实部与虚部； $I_{i,\varphi,x}^{NL,h}$ 、 $I_{i,\varphi,x}^{NL,h}$ 分别表示第 i 个节点 φ 相节点注入电流的第 h 次谐波的实部与虚部，计算公式如式(11)所示。

$$I_{i,\varphi,x}^{NL,h} = \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h - B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h), \forall i, j \in I \quad (11)$$

$$I_{i,\varphi,y}^{NL,h} = \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h + G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h), \forall i, j \in I$$

光伏发电量受到光伏阵列输出功率特性的限制，如式(12)和式(13)所示。

$$\beta^{PV} P_{\max}^{PV} \leq P_{i,\varphi}^{PV,1} \leq P_{\max}^{PV}, \forall i \in N^{PV} \quad (12)$$

$$Q_{\min}^{PV} \leq Q_{i,\varphi}^{PV,1} \leq Q_{\max}^{PV}, \forall i \in N^{PV} \quad (13)$$

式中： β^{PV} 表示光伏发电功率系数，为区间[0,1]内的常数，用以限制弃光； P_{\max}^{PV} 表示光伏最大输出功率，其数值受辐照度、电池板温度等多种因素影响； Q_{\max}^{PV} 、 Q_{\min}^{PV} 分别表示光伏向系统注入的最大无功功率与最小无功功率； N^{PV} 表示有 PV 接入的节点集合。

EV 输出的有功功率与无功功率满足以下约束。

$$P_{\min}^{EV} \leq P_{i,\varphi}^{EV,1} \leq P_{\max}^{EV}, \forall i \in N^{EV} \quad (14)$$

$$Q_{\min}^{EV} \leq Q_{i,\varphi}^{EV,1} \leq Q_{\max}^{EV}, \forall i \in N^{EV} \quad (15)$$

式中： P_{\max}^{EV} 、 P_{\min}^{EV} 分别表示电动汽车的最大功率与最小功率，在不同充电策略中计算方式不同，通常根据电动汽车的额定容量、入网时间、期望电量等因素综合计算得出^[37-38]； Q_{\max}^{EV} 、 Q_{\min}^{EV} 分别表示电动汽车向系统注入的最大无功功率与最小无功功率； N^{EV} 表示有 EV 接入的节点集合。

EV 充电器与光伏逆变器的功率以及其产生的谐波电流、谐波电压受到逆变器容量的约束，如式(16)和式(17)所示^[16]。

$$\sum_{h=1}^H [(I_{i,\varphi,x}^{PV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{PV,h})^2] \sum_{h=1}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2] \leq (S_{i,\varphi,\max}^{PV})^2, \forall i \in N^{PV} \quad (16)$$

$$\sum_{h=1}^H [(I_{i,\varphi,x}^{EV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{EV,h})^2] \sum_{h=1}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2] \leq (S_{i,\varphi,\max}^{EV})^2, \forall i \in N^{EV} \quad (17)$$

式中： $S_{i,\varphi,\max}^{PV}$ 、 $S_{i,\varphi,\max}^{EV}$ 分别表示第 i 个节点 φ 相接入的光伏逆变器与电动汽车充电器的容量。

2 求解方法

上文构建的 EV-PV 协同调度参与电能质量优化的多目标 OHPF 模型同时包含基波与谐波成分，难以直接求解。因此，本节引入交替优化的思想，将复杂的多目标 OHPF 模型分解成两个低维子问题，交替迭代求解。

2.1 交替优化法

交替优化法是一种将原问题目标函数分解为多个低维子问题进行迭代求解的一种优化方法。定义如式(18)所示的优化问题。

$$\min_{\mathbf{x} \in C \times D} f(\mathbf{x}) = \min_{\boldsymbol{\theta} \in C, \boldsymbol{\eta} \in D} f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}) \quad (18)$$

其中： $f(\mathbf{x})$ 为目标函数； \mathbf{x} 为决策变量，其限制域为 k 维欧几里得空间 \mathbb{R}^k 中的一个有界闭集 $C \times D$ ；将变量分为两个向量 $\boldsymbol{\theta}$ 、 $\boldsymbol{\eta}$ ，其限制域分别为 C 、 D 。当 $\boldsymbol{\theta}$ 被固定时，目标函数是 $\boldsymbol{\eta}$ 的凸函数，反之亦然，但目标函数对 \mathbf{x} 不一定是凸函数。

利用交替优化法求解上述优化问题，交替固定部分决策变量求解最小值点。以第 n 次迭代为例，固定 $\boldsymbol{\eta}^{n-1}$ ，在 C 中求解 $\min_{\boldsymbol{\theta} \in C} f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}^{n-1})$ ，得到最小值点 $\boldsymbol{\theta}^n$ ，然后固定 $\boldsymbol{\theta}^n$ ，在 D 中求解 $\min_{\boldsymbol{\eta} \in D} f(\boldsymbol{\theta}^n, \boldsymbol{\eta})$ ，得到最小值点 $\boldsymbol{\eta}^n$ 。反复迭代，直到满足收敛条件为止。

2.2 OHPF 模型求解

根据交替优化的思想将本文建立的 OHPF 模型分解成基波模型与谐波模型。求解流程如图 3 所示。

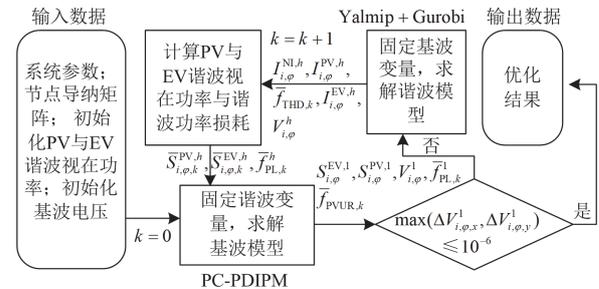


图 3 求解方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed solution method

具体计算过程如下。

1) 根据配电网结构计算基波、谐波节点导纳矩阵。将式(16)和式(17)分别改写成式(19)和式(20)的形式。

$$(P_{i,\varphi}^{PV,1})^2 + (Q_{i,\varphi}^{PV,1})^2 + (S_{i,\varphi}^{PV,h})^2 \leq (S_{i,\varphi,\max}^{PV})^2 \quad (19)$$

$$(P_{i,\varphi}^{EV,1})^2 + (Q_{i,\varphi}^{EV,1})^2 + (S_{i,\varphi}^{EV,h})^2 \leq (S_{i,\varphi,\max}^{EV})^2 \quad (20)$$

式中： $S_{i,\varphi}^{PV,h}$ 与 $S_{i,\varphi}^{EV,h}$ 包含同频谐波电压电流之间的功率与不同频交叉项的

功率, 如式(21)和式(22)所示。

$$(S_{i,\varphi,k}^{PV,h})^2 = [(V_{i,\varphi,x}^1)^2 + (V_{i,\varphi,y}^1)^2] \sum_{h=3}^H [(I_{i,\varphi,x}^{PV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{PV,h})^2] + [(I_{i,\varphi,x}^{PV,1})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{PV,1})^2] \sum_{h=3}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2] + \sum_{h=3}^H [(I_{i,\varphi,x}^{PV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{PV,h})^2] \sum_{h=3}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2], \quad \forall i \in N^{PV} \quad (21)$$

$$(S_{i,\varphi,k}^{EV,h})^2 = [(V_{i,\varphi,x}^1)^2 + (V_{i,\varphi,y}^1)^2] \sum_{h=3}^H [(I_{i,\varphi,x}^{EV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{EV,h})^2] + [(I_{i,\varphi,x}^{EV,1})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{EV,1})^2] \sum_{h=3}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2] + \sum_{h=3}^H [(I_{i,\varphi,x}^{EV,h})^2 + (I_{i,\varphi,y}^{EV,h})^2] \sum_{h=3}^H [(V_{i,\varphi,x}^h)^2 + (V_{i,\varphi,y}^h)^2], \quad \forall i \in N^{EV} \quad (22)$$

式中: $S_{i,\varphi,k}^{PV,h}$ 、 $S_{i,\varphi,k}^{EV,h}$ 分别为第 k 次迭代 PV、EV 逆变器视在功率的谐波分量。

初始化迭代次数 $k=0$ 。初始化 EV、PV 逆变器视在功率的谐波分量、基波电压与谐波功率损耗, 使 $S_{i,\varphi,0}^{PV,h}=0$ 、 $S_{i,\varphi,0}^{EV,h}=0$ 、 $V_{i,\varphi,0}^1=1$ 、 $f_{PL,0}^h=0$ 。

2) 固定谐波潮流相关变量, 求解如式(23)所示的基波模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F = \alpha_1 \bar{f}_{PL,k}^1 + \alpha_1 \sum_{h=3}^H \bar{f}_{PL,k}^h + \alpha_2 \bar{f}_{PVUR,k} + \alpha_3 \bar{f}_{THD,k} \\ \text{s.t.} \quad \beta^{PV} P_{\max}^{PV} \leq P_{i,\varphi}^{PV,1} \leq P_{\max}^{PV}, \forall i \in N^{PV} \\ Q_{\min}^{PV} \leq Q_{i,\varphi}^{PV,1} \leq Q_{\max}^{PV}, \forall i \in N^{PV} \\ P_{\min}^{EV} \leq P_{i,\varphi}^{EV,1} \leq P_{\max}^{EV}, \forall i \in N^{EV} \\ Q_{\min}^{EV} \leq Q_{i,\varphi}^{EV,1} \leq Q_{\max}^{EV}, \forall i \in N^{EV} \\ P_{i,\varphi}^{NI,1} + P_{i,\varphi}^{PV,1} + P_{i,\varphi}^{EV,1} + P_{i,\varphi}^{L,1} = 0 \\ Q_{i,\varphi}^{NI,1} + Q_{i,\varphi}^{PV,1} + Q_{i,\varphi}^{EV,1} + Q_{i,\varphi}^{L,1} = 0 \\ (P_{i,\varphi}^{PV,1})^2 + (Q_{i,\varphi}^{PV,1})^2 \leq (S_{i,\varphi,\max}^{PV})^2 - (\bar{S}_{i,\varphi,k}^{PV,h})^2, \\ \quad \forall i \in N^{PV} \\ (P_{i,\varphi}^{EV,1})^2 + (Q_{i,\varphi}^{EV,1})^2 \leq (S_{i,\varphi,\max}^{EV})^2 - (\bar{S}_{i,\varphi,k}^{EV,h})^2, \\ \quad \forall i \in N^{EV} \\ (V_{\min}^1)^2 \leq (V_{i,\varphi,x}^1)^2 + (V_{i,\varphi,y}^1)^2 \leq (V_{\max}^1)^2 \end{array} \right. \quad (23)$$

式中: “ $\bar{\quad}$ ” 表示该变量在本轮迭代中固定, 如 $\bar{f}_{PL,k}^h$ 表示第 h 次谐波功率损耗在本轮迭代中固定, 视作常数; α_1 、 α_2 、 α_3 为权重系数, 由目标的优先级决定。

3) 判断是否满足式(24)所示的收敛条件, 如满足则退出, 反之继续迭代。

$$\max(\Delta V_{i,\varphi,x}^1, \Delta V_{i,\varphi,y}^1) \leq 10^{-6} \quad (24)$$

式中: $\Delta V_{i,\varphi,x}^1$ 、 $\Delta V_{i,\varphi,y}^1$ 分别表示本轮第 i 个节点 φ 相的基波电压的实部、虚部与上一轮对应实部、虚部的差值。

4) 固定基波潮流相关变量, 求解如式(25)所示的谐波模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F = \alpha_1 \bar{f}_{PL,k} + \alpha_2 \bar{f}_{PVUR,k} + \alpha_3 \bar{f}_{THD} \\ \text{s.t.} \quad I_{i,\varphi,x}^{NI,h} + I_{i,\varphi,x}^{PV,h} + I_{i,\varphi,x}^{EV,h} + I_{i,\varphi,x}^{L,h} = 0 \\ I_{i,\varphi,y}^{NI,h} + I_{i,\varphi,y}^{PV,h} + I_{i,\varphi,y}^{EV,h} + I_{i,\varphi,y}^{L,h} = 0 \\ I_{i,\varphi,x}^{NI,h} = \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h - B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h), \forall i, j \in I \\ I_{i,\varphi,y}^{NI,h} = \sum_{j=1}^N \sum_{\psi=a,b,c} (B_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,x}^h + G_{ij,\varphi\psi}^h V_{j,\psi,y}^h), \forall i, j \in I \end{array} \right. \quad (25)$$

由于谐波的功率损耗远小于基波功率损耗, 为简化计算, 将目标函数中谐波功率损耗作常数化处理。同时, 为便于求解, 此处的谐波模型仅考虑等式约束式(11), 逆变器容量约束式(16)和式(17)在基波模型中考虑。综上, 谐波模型被简化为一个二次规划模型, 可利用求解器轻易求解。

5) 更新迭代次数 $k=k+1$, 根据式(21)和式(22)计算 PV、EV 逆变器视在功率的谐波分量 $S_{i,\varphi,k}^{PV,h}$ 、 $S_{i,\varphi,k}^{EV,h}$, 根据式(5)计算谐波功率损耗 $f_{PL,k}^h$ 。

6) 再次执行步骤 2), 反复迭代直至满足步骤 3) 所示的收敛条件。

虽然分解后步骤 2) 中的基波模型依旧是非凸的, 但现有研究表明, PDIPM 算法及其变体在求解非凸 OPF 模型上具有效率与可扩展性方面的显著优势^[39]。同时, 这种方法不会损失解的可行性。步骤 4) 中将谐波模型简化为凸模型, 确保了良好的收敛性。同时, 通过交替优化的求解策略, 有效避免了简化操作对解的可行性造成不利影响。

综上所述, 尽管本文所采用的计算方法在最优化方面可能存在一定的损失, 但它能够确保数值解的可行性和收敛性。

3 算例分析

在本节中, 使用三相不平衡的 IEEE34 节点系统与 IEEE123 节点系统验证上述模型与算法的可行性。各系统的参数如表 1 所示, 系统的其他参数与负载具体数据来源于文献[40-41]。负载均作为谐波源, 考虑 3、5、7 次谐波, 谐波源幅值与角度为根据文献[42]提供的非参数核概率模型产生的随机数。

以下测试程序均在 64 位的 Windows10 系统上运行, CPU 型号为 AMD Ryzen 3 2200U, 主频为 2.5 GHz, 内存为 12 GB。在 MATLAB r2020a 上使用

预测校正-原对偶内点法(prediction correction-primal dual interior point method, PC-PDIPM)算法对模型的基波部分求解,使用 Yalmip + Gurobi 求解器对模型的谐波部分进行求解。

表 1 系统参数

系统	IEEE34 节点	IEEE123 节点
额定电压/kV	24.9	4.16
变电站电压/p.u.	1.025	1
电压上限/p.u.	1.05	1.05
电压下限/p.u.	0.95	0.95
节点数	34	123
有功峰值负荷/MW	1.769	3.49
无功峰值负荷/Mvar	1.044	1.92
PV 数量	2/8/4	8/11/11
EV 总数量	18/18/21	40/26/32

3.1 算例 1: IEEE34 节点算例

本节以 IEEE34 节点系统为例,验证本文所提算法在某时段不同场景下的优化效果。系统的拓扑结构以及光伏、电动汽车的接入节点如图 4 所示。

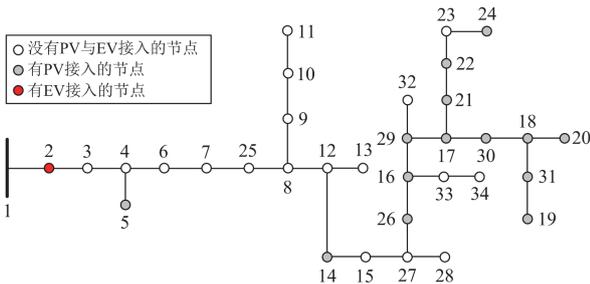


图 4 IEEE34 节点系统图

Fig. 4 IEEE34-bus test system

该系统共有 53 个负载,选取电压越上限严重的午间时段 14:00,当前时段内的有功负载为 1.592 MW,无功负载为 0.940 Mvar。此外,该系统接入 14 个光伏组件,PV 逆变器容量为 78 kVA,光伏阵列瞬时输出功率为 67.1 kW,光伏发电功率系数 β^{PV} 为 0.75。有 1 辆 EV 接入,EV 逆变器容量为 60 kVA,最大充、放电功率均为 45 kW。

设置不同场景分析 EV-PV 接入的优化效果以及权重系数对优化效果的影响。其中,场景 s1 作为基准场景,EV 与 PV 直接接入,不做调度。场景 s2—s5 对接入的 EV-PV 进行调度优化,对应目标函数的权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为(1,0,0)、(0,1,0)、(0.3,0.3,0.4)、(0.15,0.35,0.5)。优化结果如表 2 所示。

场景 s2 的功率损耗与场景 s3 的电压不平衡度优化效果最显著,分别比场景 s1 下降了 30.45%与 97.78%,各场景谐波失真度均下降了 99.97%。上述

场景中,各目标函数均有不同程度下降。可见,EV-PV 协同优化对降低功率损耗、减小电压不平衡度与谐波失真度均具有显著的效果。

表 2 IEEE34 节点系统优化结果

Table 2 Optimal results for IEEE34-bus system

场景	f_{PL}/MW	f_{PVUR}	f_{THD}
s1	6.83×10^{-2}	3.22×10^{-3}	3.05
s2	4.75×10^{-2}	5.40×10^{-3}	7.98×10^{-4}
s3	5.60×10^{-2}	7.14×10^{-5}	7.98×10^{-4}
s4	4.85×10^{-2}	5.68×10^{-4}	7.98×10^{-4}
s5	4.98×10^{-2}	4.12×10^{-4}	7.98×10^{-4}

注:加粗表示所有场景中该目标函数的最小值。

对比场景 s2—s5 的优化结果可得,通过调整权重系数能够实现不同优化目标之间的灵活权衡,达到符合需求的优化效果。此外,场景 s2—s5 的谐波失真度优化效果相同,是由于谐波失真度在谐波模型中独立进行优化,不受权重系数变化的影响。

各场景的光伏发电有功功率如图 5 所示,其中红色虚线表示光伏发电功率下限。结果表明,针对各场景的优化目标,光伏发电功率做出了相应的调整。同时,在光伏功率下限的约束下,光伏弃光功率能被有效地限制在可接受的范围内。

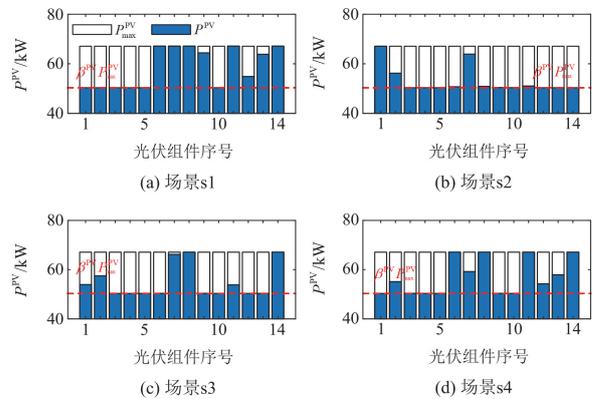


图 5 IEEE34 节点系统中光伏发电有功功率

Fig. 5 Active power of PV generation in IEEE34-bus system

图 6 对比了场景 s1 与场景 s4 的电压分布曲线。在无优化的场景 s1 中,b 相的大部分节点电压均超过 1.05 p.u.,存在严重的电压越限情况,且三相电压幅值差异大,电压不平衡度高。优化后的场景 s4 中,b 相电压大幅降低,过电压现象被消除,同时电压不平衡的程度减轻。

图 7(a)与图 7(b)分别对比了场景 s1、s4 与 s5 的节点谐波失真度与电压不平衡度。如图 7(a)所示,场景 s1(左侧 y 轴)的 b 相部分节点谐波失真度超过标准规定的 5%限值^[43],优化后场景 s4、s5(右侧 y

轴)各节点谐波失真度实现了显著下降, 其中最大谐波失真度从 5.59% 下降到 0.01%。类似地, 如图 7(b) 所示, 优化后大部分节点的电压不平衡度有所下降。然而, 在场景 s4 中, 部分节点的不平衡度不降反升, 这是由于降低不平衡度与降低功率损耗之间存在冲突, 为了达成总目标的最优, 选择牺牲电压不平衡度来降低功率损耗。但整体而言, 所提方法实现了全局电能质量的显著提升。

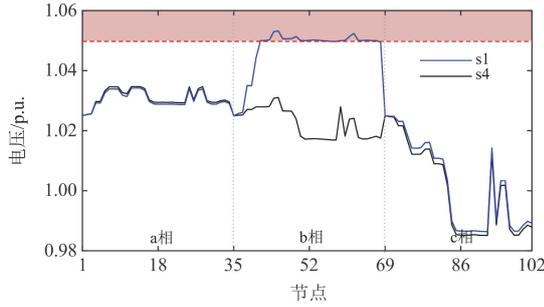
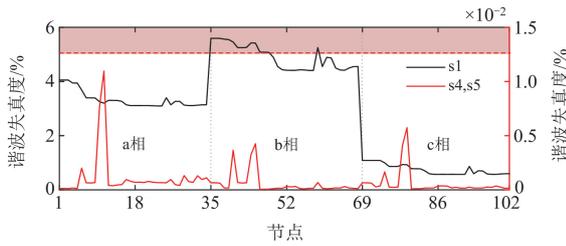
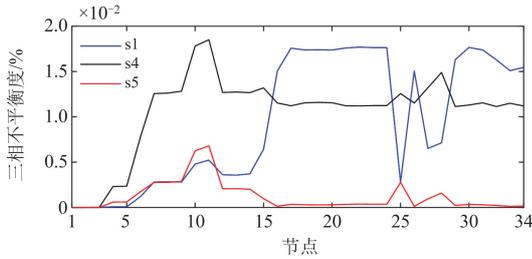


图 6 IEEE34 节点系统的电压曲线

Fig. 6 Voltage profile of IEEE34-bus system



(a) 各场景谐波失真度



(b) 各场景三相不平衡度

图 7 IEEE34 节点系统的优化结果

Fig. 7 Optimal results of IEEE34-bus system

场景 s4 的谐波源与 EV-PV 产生的谐波电流如图 8 所示。图中, 四边形与三角形标记分别代表谐波源与 EV/PV 注入的谐波电流(左侧 y 轴), 蓝色与红色线段分别对应其代数和(右侧 y 轴)。虽然由于谐波源与补偿装置在配电网中的空间分布差异导致补偿电流与谐波源无法在复平面的相对象限上一一对应, 但全局来看, EV-PV 注入的谐波电流与谐波源电流在复平面上呈现近似反向对称分布。可见,

本文所提方法通过调节多节点的谐波注入, 在全局层面实现谐波抵消, 使谐波失真度显著下降。

综上所述, 本文所提出的 EV-PV 协同调度多目标 OHPF 模型不仅可以整体提升配电网的电能质量, 而且在每个节点上都能展现出良好的优化效果, 达到了消除电压越限、减小功率损耗、降低谐波失真度与电压不平衡度的目的。同时, 该模型的权重系数能够起到很好的调节作用, 可以通过选择合适的权重系数来应对不同的优化目标需求。

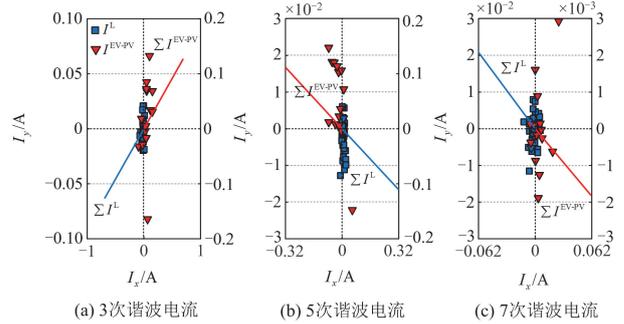


图 8 IEEE34 节点系统中 EV-PV 与谐波源注入的谐波电流

Fig. 8 Harmonic current injected by EV-PV and harmonic source in IEEE34-bus system

3.2 算例 2: IEEE123 节点算例

为进一步验证本文所提方法在更大规模系统上的优化效果与选取 EV-PV 作为补偿设备的合理性, 本节以 IEEE123 节点系统为例, 对接入 EV-PV 与接入相同容量储能系统(energy storage system, ESS)的优化效果进行对比。

IEEE 123 节点系统的拓扑结构以及 PV、EV 的接入节点如图 9 所示。

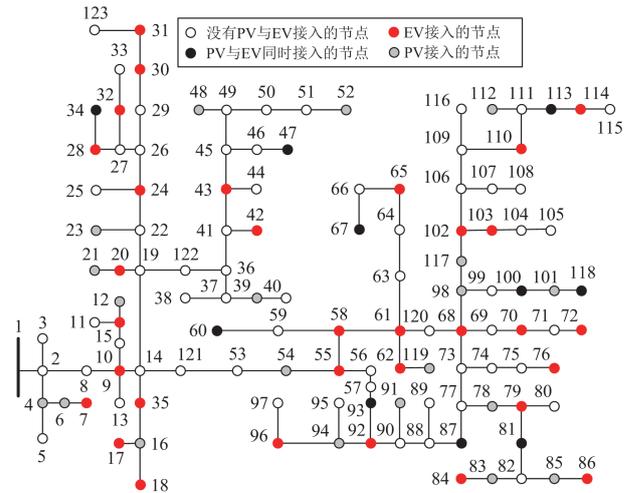


图 9 IEEE123 节点系统图

Fig. 9 IEEE123-bus test system

该系统共有 85 个负载,有功负载为 2.967 MW,无功负载为 1.632 Mvar,光伏发电功率系数 β^{PV} 为 0。设置不同场景分析 ESS、EV-PV 的优化能力。选取电压越下限较严重的夜间时段。接入系统的调节设备的基本信息如表 3 所示。其中 ESS 为三相设备,分别接入节点 19 与 55。场景 s1 表示 EV-PV 直接接入的场景,场景 s2—s4 中 EV-PV 协同参与优化,目标函数的权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为 (1,0,0)、(0,1,0)、(0.15,0.35,0.5)。场景 s5—s7 中 ESS 参与优化,权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为(1,0,0)、(0,1,0)、(0.15,0.35,0.5)。优化结果如表 4 所示。

表 3 系统基本信息

Table 3 Basic information of system

调节设备	PV	EV	ESS
数量	8/11/11	21/24/27	2/2/2
最大有功功率/kW	0	±40	±795
逆变器容量/kVA	15	60	795
总容量/MVA		4.77	

表 4 IEEE123 节点系统优化结果

Table 4 Optimal results for IEEE123-bus system

场景		f_{PL}/MW	$f_{PVUR}/\%$	$f_{THD}/\%$
无优化	s1	0.0332	1.0306	2.5941
	s2	0.0052	0.3006	0.0043
EV-PV	s3	0.0169	0.0020	0.0043
	s4	0.0068	0.0299	0.0043
ESS	s5	0.0230	1.4519	0.3469
	s6	0.0287	0.2485	0.3469
	s7	0.0283	0.2625	0.3469

注:加粗表示所有场景中该目标函数的最小值。

对比以上数据可知,在 EV-PV 协同优化的场景下,所达到的单目标最优解相较于仅通过 ESS 接入的优化策略,展现出了更为优异的性能。其中,在谐波失真度的改善方面, EV-PV 协同优化显示出显著的优化效果。同时,对比权重系数相同的场景 s4 与场景 s7,场景 s4 的各目标函数的优化效果均更显著。这表明在接入容量相同的情况下, EV-PV 协同调度的优化效果整体上优于 ESS 调度的优化效果。

3.3 算例 3: 不同渗透率下优化效果对比

为验证本文所提方法在 EV-PV 渗透更严重的配电网中的优化效果,本节以 IEEE34 节点系统为例,选取不同 EV-PV 渗透率的场景进行验证。

从平台 Meteororm 8 选取某地某年 6 月的辐照数据,导入平台 PVsyst 仿真得到光伏发电出力曲线。EV 并网时间、离网时间分别选取以 20:00、08:00 为中心的正态分布随机数。EV 初始荷电状态数据为根据文献[44]的概率模型生成的随机数。负

荷曲线、光伏出力曲线与 EV 接入数量如图 10 所示。该系统接入 14 个光伏组件,最高同时有 57 辆 EV 在网,有功负荷峰值为 1.769 MW,无功负荷峰值为 1.044 Mvar。

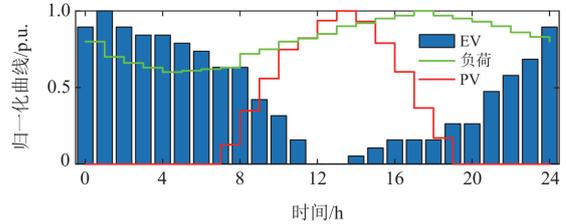


图 10 负荷、光伏出力与电动汽车接入数量归一化曲线
Fig. 10 Normalized curves of load, photovoltaic output and the number of EV connections

设置场景 s0—s4,其中场景 s0 没有接入 EV-PV,场景 s1 与场景 s2 中 EV 与 PV 直接接入,不做调度。场景 s1 中,光伏逆变器容量为 40 kVA,最大光伏阵列瞬时输出功率为 36 kW;EV 逆变器容量为 30 kVA, EV 最大充、放电功率均为 20 kW。场景 s2 中,光伏逆变器容量为 80 kVA,最大光伏阵列瞬时输出功率为 72 kW;EV 逆变器容量为 60 kVA, EV 最大充、放电功率均为 40 kW。场景 s3 与场景 s4 分别在场景 s1 与 s2 的基础上对接入的 EV-PV 进行调度优化,光伏发电功率系数 β^{PV} 为 0。其中,目标函数的权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 均设置为 (0.8,0.1,0.1)。

图 11 展示了场景 s0—s4 的最大、最小电压曲线。其中,范围 A 与范围 B 为文献[43]中规定的电压范围,该标准规定大多数工作电压应处于范围 A 内,当电压在范围 B 外时应采取措施以改善电压。仿真结果表明,场景 s1 与 s2 在夜间出现严重的电压越下限现象,场景 s2 在光伏发电高峰期出现过电压现象,且 EV-PV 渗透率越高,电压越限问题越严重。优化后的最大、最小电压曲线与场景 s0 的电压曲线相近,这一结果表明, EV-PV 协同调度可以有效消除全天的电压越限问题,确保电力系统的稳定运行。

场景 s0—s4 的优化结果如图 12 所示。图 12(a)展示了各场景下的功率损耗,图 12(b)展示了各场景下的电压不平衡度。对比场景 s0—s2, EV 的大量接入导致夜间的功率损耗与电压不平衡度上升,光伏的接入使日间这两个指标优于基础场景 s0,且随着渗透率的增加进一步降低。此现象是由于光伏接入引发电压抬升,进而使得线路电流降低,从而产生了优化效果。分析场景 s1—s4 的优化结果,这些场景在优化后均展现出卓越的性能,场景 s3 与 s4

的功率损耗与电压不平衡度在几乎所有时段均低于基础场景 s0。

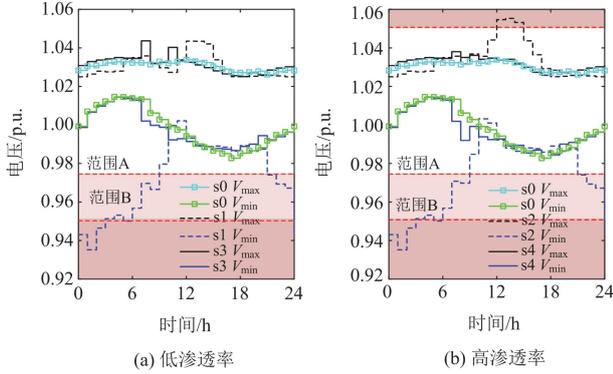


图 11 24 h 最大、最小电压曲线

Fig. 11 Maximum and minimum voltages during 24 hours

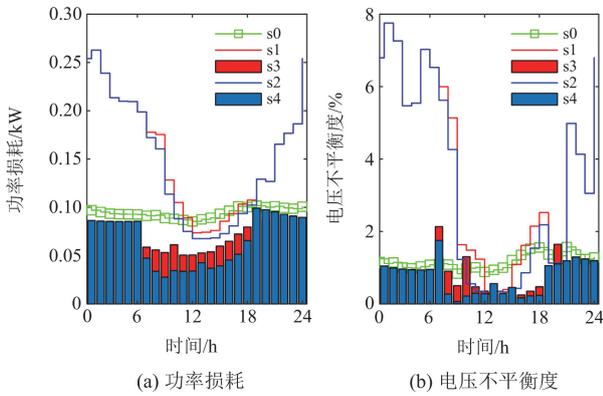


图 12 24 h 优化结果

Fig. 12 Optimal results during 24 hours

综上所述,高渗透率的 EV-PV 无序接入会不可避免地引发地各类电能质量问题,且这些负面影响会随着渗透率的提高而加重。本文所提出的 EV-PV 协同优化方法能够确保在各个时段都实现显著且稳定的优化效果,在多数情况下,改善后的电能质量甚至优于无 EV-PV 接入的基准场景。且随着 EV-PV 渗透率的上升,优化效果进一步提升,电压不平衡度与功率损耗进一步降低。

3.4 算法收敛性分析

本节以 IEEE123 节点系统为例,设置不同场景验证本文所提算法的收敛性能。其中,场景 s1 选取 12:00 的数据,目标函数的权重系数为(0.15,0.35,0.5),场景 s2 选取 20:00 的数据,目标函数的权重系数为(0.15,0.35,0.5)。

PC-PDIPM 算法设定的最大迭代次数为 100,以对偶间隙为收敛指标,当对偶间隙小于 10^{-6} 时,模型收敛。收敛过程中 PC-PDIPM 算法的对偶间隙如图 13 所示。可见,当对偶间隙减小到 10^{-6} 以下

时,便进入新一轮迭代,经过 3 轮迭代,算法停止,每轮迭代次数均在 100 次以内。两个场景的迭代次数不同,这是由于算法收敛性能受到约束的影响。

收敛过程的各项数据如表 5 所示。 $\max(\Delta V)$ 表示各轮迭代之间电压幅值的最大变化量,其计算公式如式(24)所示,从表 5 可以看出,从第 1 轮迭代到第 3 轮迭代,变化量逐渐减小,第 3 轮迭代后 $\max(\Delta V)$ 小于 10^{-6} ,迭代停止。

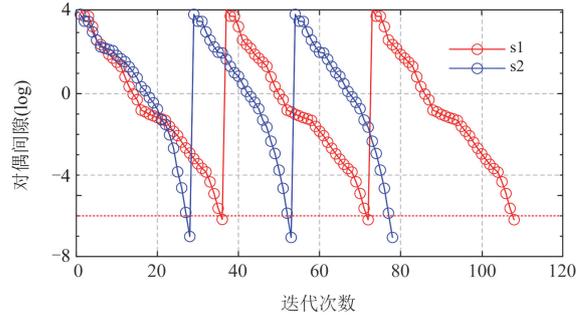


图 13 对偶间隙的收敛曲线

Fig. 13 Convergence curve of the duality gap

表 5 收敛过程数据

Table 5 Data for the convergence process

场景	$\max(\Delta V)$		
	第 1 轮	第 2 轮	第 3 轮
s1	2.3248×10^{-2}	3.4229×10^{-4}	0
s2	2.3451×10^{-2}	6.5965×10^{-6}	0

3.5 算法效率分析

本节以 IEEE34 节点系统为例,将本文所提方法与现有常用的多目标 OHPF 求解方法进行对比,当前主流的 OHPF 计算方法依赖于启发式算法,本文选取非支配排序遗传算法-III(non-dominated sorting genetic algorithm-III, NSGA-III)作为对比。NSGA-III 算法的迭代次数为 100,分区数量为 10,种群规模为 200,交叉比例为 0.5,变异比例为 0.5,变异概率为 0.06。由于 NSGA-III 算法的优化结果是由一系列值组成的帕累托前沿,为便于比较,此处对比两种算法求解出的单目标最优。求解时间与优化结果对比如表 6 所示。

表 6 不同算法的求解时间与结果

Table 6 Solution time and results of different algorithms

算法	求解时间/s	最小功率损耗/MW	最小电压不平衡度/%	最小谐波失真度/%
(1,0,0)	1.51	0.0361	—	—
本文 (0,1,0)	2.76	—	0.0016	—
(0,0,1)	1.00	—	—	0.0860
NSGA-III	776.72	0.0419	0.0026	0.0790

注:加粗表示所有场景中该目标函数的最小值。

可见,不同目标函数权重系数条件下,本文所提算法在1~3 s之间完成优化,相比之下,NSGA-III的求解时间高达776.72 s。在降低功率损耗和改善电压不平衡度方面,本文算法的表现均超越了NSGA-III,并且其时间成本远低于后者。综上,本文所提算法在优化效果与效率之间实现了很好的平衡。

4 结论

本文针对三相不平衡配电网的电能质量问题,提出一种EV-PV协同调度策略。该策略构建的多目标OHPF模型以减小功率损耗、降低电压不平衡度与谐波失真度为目标,实现稳态电能质量的提升。为求解上述模型,提出一种基于交替优化思想的两阶段迭代算法。该算法的核心在于将原始的OHPF模型巧妙地分解为两个子模型:OPF子模型与二次规划子模型。分别采用PC-PDIPM算法和Gurobi求解器对这两个子模型进行迭代求解,从而实现原OHPF模型的高效求解。

利用IEEE34节点系统与IEEE123节点系统对本文所提方法进行了有效性验证。结果表明,本文所提框架不仅能在全时段显著提升系统的电能质量,而且在系统大部分节点上实现了功率损耗、电压不平衡度以及谐波失真度的有效降低。此外,将该算法与其他算法进行比较,结果表明本文算法在优化效果与效率之间实现了很好的平衡。

下一步作者将考虑光伏与电动汽车带来的不确定性影响,以提升模型的鲁棒性;同时将EV经济性优化模型与本文所提框架融合,提升调度过程中EV的经济性,从而增强模型的实际工程价值。

参考文献

- [1] 江友华, 宫唯佳, 曹以龙, 等. 基于灵敏度分析的谐波治理设备多目标优化配置方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 77-82.
JIANG Youhua, GONG Weijia, CAO Yilong, et al. Multi-objective optimal configuration method of harmonic control device based on sensitivity analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 77-82.
- [2] 邓伊扬, 徐方维, 杨永恒, 等. 同时计及SVG和长线路分布参数的谐波不稳定源定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 140-149.
DENG Yiyang, XU Fangwei, YANG Yongheng, et al. Research on harmonic instability source localization considering both SVG and long transmission line distributed parameters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 140-149.
- [3] 高波, 何福长, 韩建, 等. 计及频率耦合的单相光伏变流器谐波潮流分析模型[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 216-225.
GAO Bo, HE Fuchang, HAN Jian, et al. Analysis model of harmonic power flow for single-phase photovoltaic converters considering frequency coupling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 216-225.
- [4] 徐少博, 徐永海, 陶顺, 等. 谐波扰动下PWM边带谐波特性分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 172-181.
XU Shaobo, XU Yonghai, TAO Shun, et al. Analysis of PWM sideband harmonic characteristics with harmonic disturbance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 172-181.
- [5] OMRAN N G, FILIZADEH S. A semi-cooperative decentralized scheduling scheme for plug-in electric vehicle charging demand[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 88: 119-132.
- [6] WANG Ying, WANG Xinru, LI Shunyi, et al. Optimization model for harmonic mitigation based on PV-ESS collaboration in small distribution systems[J]. Applied Energy, 2024, 356.
- [7] BERES R N, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Optimal design of high-order passive-damped filters for grid-connected applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(3): 2083-2098.
- [8] YANG Zebin, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A system-level harmonic control method based on multibus voltage detected APF without exact phase synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2618-2631.
- [9] 张华赢, 杨泽斌, 易皓, 等. 面向局域配电网谐波网损综合抑制的有源电力滤波器多目标优化配置策略[J]. 供用电, 2024, 41(2): 73-80.
ZHANG Huaying, YANG Zebin, YI Hao, et al. Multi-objective optimization configuration strategy for SAPF of harmonic loss comprehensive suppression in local distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 73-80.
- [10] 尚博文, 徐铭铭, 张金帅, 等. 高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J]. 智慧电力, 2024, 52(12): 1-11.
SHANG Bowen, XU Mingming, ZHANG Jinshuai, et al. Review of voltage regulation methods in distribution networks with high proportions of distributed photovoltaic integration[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 1-11.
- [11] SRINIVAS V L, SINGH B, MISHRA S, et al. Harmonic voltage control in distributed generation systems using optimal switching vector strategy[J]. IEEE Systems Journal,

- 2022, 16(2): 1861-1872.
- [12] ZHONG Cheng, WANG Pengcheng, LIU Chuang, et al. Optimal harmonic compensation for grid-connected photovoltaic inverters under limited compensation margin[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 241.
- [13] 夏烈, 陈志磊, 杨青斌, 等. 弱电网下构网型LCL逆变器谐波电流抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 130-139.
- XIA Lie, CHEN Zhilei, YANG Qingbin, et al. Harmonic current suppression of a grid-forming LCL inverter in a weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 130-139.
- [14] 姜爱军, 方品政, 胡南, 等. 抽水蓄能电站静止变频器启动谐波特性分析及抑制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 113-121.
- JIANG Aijun, FANG Pinzheng, HU Nan, et al. Harmonic characteristics analysis & suppression strategies for SFC starting of pumped storage power plant[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 113-121.
- [15] 吴兴奇. 光伏并网逆变器电流谐波主动抑制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- WU Xingqi. Research on active suppression strategy of current harmonics in PV grid-connected inverters[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [16] LAMBERTI F, CALDERARO V, GALDI V, et al. Massive data analysis to assess PV/ESS integration in residential unbalanced LV networks to support voltage profiles[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 206-214.
- [17] ZERAATI M, HAMEDANI GOLSHAN M E, GUERRERO J M. A consensus-based cooperative control of PEV battery and PV active power curtailment for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 670-680.
- [18] FACHRIZAL R, SHEPERO M, ÅBERG M, et al. Optimal PV-EV sizing at solar powered workplace charging stations with smart charging schemes considering self-consumption and self-sufficiency balance[J]. Applied Energy, 2022, 307.
- [19] 石铖, 安锐, 高红均, 等. 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 133-144.
- SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 133-144.
- [20] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 1-13.
- [21] 严晗, 徐晓春, 张毅, 等. 基于特征匹配和灵敏度辅助决策的配电网优化调控技术[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2): 112-124.
- YAN Han, XU Xiaochun, ZHANG Yi, et al. Optimization and control technology of a distribution network based on feature matching and sensitivity-assisted decision making[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2): 112-124.
- [22] GIRALDO J S, VERGARA P P, LÓPEZ J C, et al. A linear AC-OPF formulation for unbalanced distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4462-4472.
- [23] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的UPFC优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 42-48.
- LIU Chang, WU Jun, HAO Luxi, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.
- [24] DAVOODI E, BABAEI E, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Multiobjective optimal power flow using a semidefinite programming-based model[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 158-169.
- [25] HASAN M S, CHOWDHURY M M U T, BISWAS B D, et al. Semi-definite programming based scalable and accurate optimal power flow models for radial distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1463-1475.
- [26] CHOWDHURY M M U T, BISWAS B D, KAMALASADAN S. Second-order cone programming (SOCP) model for three phase optimal power flow (OPF) in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3732-3743.
- [27] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.
- CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [28] HONG Yingyi. Optimal harmonic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1267-1274.
- [29] WANG Jian, ZHOU Niancheng, RAN Yunhao, et al. Optimal operation of active distribution network involving the unbalance and harmonic compensation of converter[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5360-5373.
- [30] DAS T, ROY R, MANDAL K K. Impact of the penetration

- of distributed generation on optimal reactive power dispatch[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(4): 1-26.
- [31] NGUYEN T T. A high-performance social spider optimization algorithm for optimal power flow solution with single objective optimization[J]. *Energy*, 2019, 171: 218-240.
- [32] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 77-87.
- GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 77-87.
- [33] AZEREDO L F S, YAHYAOU I, FIOROTTI R, et al. Study of reducing losses, short-circuit currents and harmonics by allocation of distributed generation, capacitor banks and fault current limiters in distribution grids[J]. *Applied Energy*, 2023, 350.
- [34] GHORAI A, MANDAL B, ROY P K, et al. Oppositional based artificial rabbits optimization applied for optimal allocation of nonlinear DG in distribution networks considering total harmonic distortion limit[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 231.
- [35] 国家能源局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- National Energy Administration. Quality of electric energy supply—harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [36] 武汉国测科技股份有限公司, 中国电力科学研究院, 中机生产力促进中心. 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京市: 中国标准出版社, 2009.
- Wuhan Guoce Technology Co., Ltd., China Electric Power Research Institute, China Productivity Center for Machinery Co., Ltd. Power quality—three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [37] MORSTYN T, CROZIER C, DEAKIN M, et al. Conic optimization for electric vehicle station smart charging with battery voltage constraints[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(2): 478-487.
- [38] WU Fuzhang, YANG Jun, KE Song, et al. Coordinated fault risk prevention in coupled distribution and transportation networks considering flexible travel demands[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(4): 16-27.
- [39] DE ARAUJO L R, PENIDO D R R, VIEIRA F D. A multiphase optimal power flow algorithm for unbalanced distribution systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 53: 632-642.
- [40] IEEE PES Distribution Test Feeders. IEEE 34 node test feeder[DB/OL]. [2025-01-21]. <http://sites.ieee.org/pestest/feeders/resources>
- [41] IEEE PES Distribution Test Feeders. IEEE 123 node test feeder[DB/OL]. [2025-01-21]. <http://sites.ieee.org/pestest/feeders/resources>
- [42] RODRÍGUEZ-PAJARÓN P, HERNÁNDEZ A, MENDONÇA H, et al. Residential harmonic injection models based on field measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(1): 575-587.
- [43] National Electrical Manufacturers Association. American national standard for electric power systems and equipment-voltage ratings (60 Hertz): ANSI C84.1—2020[S]. Washington: National Electrical Manufacturers Association, 2020.
- [44] LIU Weicheng, SHI Xujiang, ZHAO Jianfeng, et al. Electric vehicle charging simulation framework considering traffic, user, and power grid[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(3): 602-611.

收稿日期: 2025-04-02; 修回日期: 2025-08-10

作者简介:

邓诗扬(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为最优潮流计算; E-mail: shiyang.deng@foxmail.com

周群(1966—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源与电力电子、电工理论与新技术; E-mail: zhouqunsc@163.com

马晓阳(1991—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网控制、电能质量分析. E-mail: mxy_scu@163.com

(编辑 周金梅)