第 49 卷 第 1 期：147-162 高电压技术 Vol.49, No.1: 147-162
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220098

含能源路由器的交直流互联配电网协调动态优化

仇书山[1]，陈劲帆[1]，毛承雄[1]，马春艳[2]，刘　哲[3]，王　丹[1]
（1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室，武汉 430074;
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192; 3. 国网上海市电力公司，上海 200122）

摘　要：能源路由器(energy router，ER)作为能源互联网的关键设备，可以灵活控制潮流分配，提升电压水平，实现区域互联、能量互济、故障隔离等功能，研究采用 ER 实现交直流互联配电网的优化运行具有重要意义。考虑到 ER 和多种有功和无功调节设备的协同运行，提出了一种日前–日内双时间尺度下的有功–无功协调动态调度模型，该模型以系统综合成本和电压偏移度为目标函数，通过日前离散设备调度和日内连续设备调节相互配合，实现协调动态优化。提出了一种改进的多目标粒子群算法求解模型，以改进的 IEEE 33 节点交流配网和 13 节点直流配网系统作为仿真样本，结果表明，ER 的接入对降低配电系统损耗、改善电能质量、优化运行策略、促进新能源消纳和降低综合成本有积极影响，并验证了所述算法的有效性。

关键词：能源路由器；交直流互联电网；高比例新能源；动态优化；改进 MOPSO

Coordinated Dynamic Optimization of AC-DC Interconnected Distribution Network Based on Energy Router

QIU Shushan[1], CHEN Jingfan[1], MAO Chengxiong[1], MA Chunyan[2], LIU Zhe[3], WANG Dan[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract：The energy router (ER), as a key device of Energy Internet, can flexibly control the power flow distribution, increase the voltage level, and realize the functions such as regional interconnection, energy mutual aid, and fault isolation. Studying the application of ER to achieve the optimization of AC-DC interconnected distribution network operation is of great significance. In this paper, the coordinated operation of ER and multiple active and reactive power regulating devices is taken into consideration, and a dynamic scheduling model of active and reactive power coordination under the dual time scales of day-ahead and intraday is proposed. This model takes the overall system cost and voltage deviation as the objective function. Discrete equipment scheduling and intraday continuous equipment adjustment cooperate with each other to achieve coordinated dynamic optimization. An improved multi-objective particle swarm algorithm (MOPSO) is proposed to solve the model. The improved IEEE 33-node AC distribution network and 13-node DC distribution network system are used as simulation samples. The results show that ER access has a positive impact on reducing power distribution system losses, improving power quality, optimizing operating strategies, promoting renewable energy consumption, and reducing overall costs, and the effectiveness of the algorithm is verified.

Key words：energy router; AC-DC interconnected network; high penetration of renewable energy; dynamic optimization; improved MOPSO

0　引言

相比交流配电网，直流配电方式对分布式电源(distributed generator，DG)及储能系统(energy storage system，ESS)等直流型电源具有更好的适应性。此外，直流供电将促进电动汽车充电站、数据中心等新型直流负荷更加广泛地接入电网。凭借直流系统的优势，交直流混合配电网络近来得到了极大的普及[1]。

面对日益增加的 DG 接入，电网中传统的控制策略已不再适应，在传统的调节装备中：有载调压变压器(on-load tap changer，OLTC)、投切电容器

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5442PD190008)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5442PD190008).

(capacitor bank，CB)在接纳越来越多的分布式 DG 方面由于响应缓慢、无法连续调节，逐渐显得力不从心，当 DG 和负载波动时，难以满足高精度的实时电压和无功控制。在交直流电网运行优化方面：文献[2]分析了主动配电网中实现协调优化的调度方法和电压控制策略；文献[3-4]建立了交直流配电网的日前优化调度模型，分析了多种主动管理措施协调的有功–无功协调优化效果，但研究重点仍聚焦于传统无功设备上，难以满足高比例新能源的接入，需要寻找有效策略以适应新型电力系统建设需求。

在能源互联网的推进建设过程中，能源路由器(energy router，ER)应运而生[5]。ER 可以灵活调节电网潮流，实时快速地控制端口功率，保障互联电网的潮流互济，实现故障隔离和灵活转供电，极大地提高配电网灵活性和可靠性，因此 ER 被认为是构建未来智能电网、能源互联网的关键部分[6]。

目前，国内外不同研究中对于 ER 的命名和拓扑结构各有不同，但其功能基本一致。文献[7]提出了多接口 ER 的结构，并验证了其正确性和有效性；文献[8]研究了 ER 在配电网和综合能源微网之间的协调运行，并提出了有效的协调控制策略；文献[9]提出了以全控柔性化配电装备为核心的交直流无缝混合灵活配电系统及其组网模型，通过仿真模型论证了 ER 在交直流配电系统中应用的可行性、有效性和优越性。以上文献对于 ER 的研究主要集中在拓扑结构和控制策略等方面。

在能源互联网的配电端，区域间不同配网或配网内部不同馈线通过 ER 互联，可以发挥 ER 在潮流控制和能量管理方面的优势，有利于平衡线路功率，促进新能源的消纳，同时可以满足不同电压等级的交直流电网平等接入[9-10]，协调各区域电网间的功率交互，进而提升电网的供电可靠性和经济性。

关于能源路由器在电网运行优化中的研究，在运行仿真方面：文献[11]针对 ER 在交直流电网中的控制策略进行了仿真分析，以稳定直流电压并跟踪负载需求，通过仿真和多种工况验证了所提控制策略的有效性；文献[12]研究了 ER 的拓扑结构及其在交直流互联系统及能源互联网中的应用前景，并提出了有效的协调控制策略；以上文献重点关注交直流系统中 ER 控制策略的仿真分析。在优化调度方面：文献[13-15]分析了能源路由器的潮流计算模型以及对配电网优化的影响，可以使电网运行更加灵活，但只考虑了系统电压的控制；文献[16]提出了多端口 ER 在交直流混合系统中的控制策略，验证了 ER 在潮流控制方面的优越性，但是没有分析 ER 的经济效益；文献[17]提出了 ER 在低压配电网中的经济调度策略，并验证了其在提升电能质量和经济性方面的有效性，但是没有考虑 ER 的潮流控制能力；文献[18]研究了能源路由器在交直流混合电网中的应用，并验证了通过 ER 端口互联，可以提升配电系统的新能源接纳能力和经济运行，但是仅关注了 ER 本身的优化效果。

以上研究验证了 ER 在电网中潮流控制、电压改善方面的有效性，但没有考虑 ER 和传统调节设备的协调运行，对控制变量考虑不够全面，优化模型有待完善；也没有考虑多区域间交直流电网的能量互济，对能源互联网的特性挖掘不够。

由于电力电子设备造价较高，难以在短时间内完全取代传统调节设备，研究交直流互联电网中 ER 和其他传统调节装置的有功–无功协调优化控制具有重要意义。本文充分考虑交直流电网中可调节因素和能源互联网的区域互联、能量互济的特点，提出一种基于 ER 的交直流互联电网有功–无功协调的多目标动态优化模型，为防止 DG 和负荷功率的实时波动导致电压越限，建立了日前–日内双时间尺度的调度架构。该模型以电压偏移和综合运行成本为目标，研究了区域互联电网中，ER 和多个功率调节设备的协调运行模式，以提高基于 ER 的交直流互联电网的供电质量和经济效益，并提出一种改进多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization，MOPSO)求解该模型。结果表明交直流电网间通过 ER 实现灵活高效互动，综合提升系统的运行可靠性与经济性，对智能电网和能源互联网的建设有一定的理论指导价值。

1 ER 模型及控制策略

1.1 ER 的拓扑结构

多端口 ER 的拓扑结构如图 1 所示[14]，包含以 AC/DC 变换器为基础的交流端口和以 DC/DC 变换器为基础的直流端口。所有端口均与直流母线相连，直流母线通过 DC/DC 变换器进行能量交换。ER 由全控型功率器件组成，控制方式灵活多样，可以连续控制功率双向流动，实现交直流柔性互联。

ER 的各端口既可以连接同一网络的不同馈线，也可以连接不同网络。图 1 中，$U_k^{\mathrm{AC}}\angle\theta_k$ 和 U_k^{DC} 分别为交流馈线和直流馈线末端电压；$P_k^{\mathrm{AC}}+\mathrm{j}Q_k^{\mathrm{AC}}$ 为

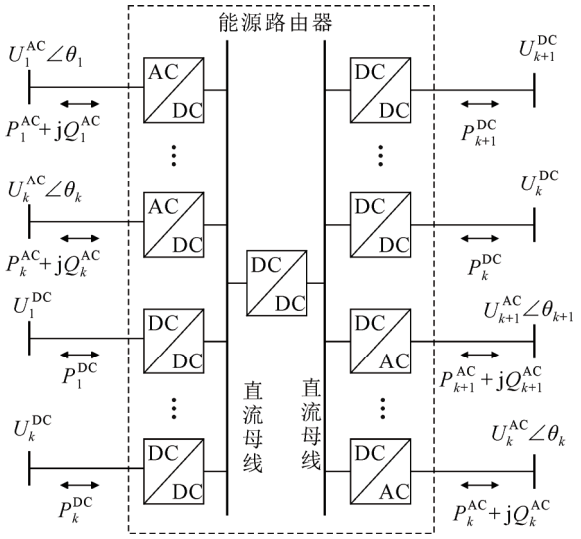


图 1 ER 拓扑结构图

Fig.1 Topology diagram of energy router

交流端口的有功和无功功率；P_k^{DC} 为直流端口的有功功率。

ER 可以在一定容量下实时调节功率，促进电网间的能量互济以及馈线负载的均衡分配，从而发挥闭环运行的优势，对系统潮流运行方式进行优化，满足负荷对高供电质量的要求。基于 ER 的交直流互联智能配电网能在线监控并实时调整配电网运行状态，充分发挥交流和直流配电网各自的优势和潜力，对交直流互联电网进行灵活、快速、经济的潮流控制和优化，可以促进以电网为载体的区域间局部能源互联网的形成与发展。

1.2 ER 数学模型

对于 ER 运行模型，其决策变量包括：各个端口的有功功率和无功功率，所有端口的输入有功功率、输出有功功率和有功损耗之和为 0。对于交流端口，每个端口具备无功功率独立调控功能[19]；对于直流端口，由于直流系统没有无功功率，直流端口只进行电压和有功功率的控制，每个端口具备电压及有功功率独立调控功能[14]，采用定电压控制时，端口功率可通过求解直流网络潮流得出。因此，ER 各端口的功率关系可描述为

$$\begin{cases} \sum P_{i,t}^{\mathrm{ER}} + \sum L_{i,t}^{\mathrm{ER}} = 0 \\ Q_{i,\min}^{\mathrm{ER}} \le Q_{i,t}^{\mathrm{ER}} \le Q_{i,\max}^{\mathrm{ER}} \\ L_{i,t}^{\mathrm{ER}} = A_i^{\mathrm{ER}} \sqrt{(P_{i,t}^{\mathrm{ER}})^2 + (Q_{i,t}^{\mathrm{ER}})^2} \\ \sqrt{\left(P_{i,t}^{\mathrm{ER}}\right)^2 + \left(Q_{i,t}^{\mathrm{ER}}\right)^2} \le S_i^{\mathrm{ER}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{ER}}$ 和 $Q_{i,t}^{\mathrm{ER}}$ 分别为 t 时段与节点 i 所连端口注入(流出)的有功功率和无功功率；$L_{i,t}^{\mathrm{ER}}$ 为 ER 在 t 时段与节点 i 所连端口的有功损耗；$Q_{i,\max}^{\mathrm{ER}}$ 和 $Q_{i,\min}^{\mathrm{ER}}$ 分别为 t 时段与节点 i 所连端口的无功功率上、下限；A_i^{ER} 为 ER 的损耗系数；S_i^{ER} 为与节点 i 相连的端口容量。

1.3 基于 ER 的交直流互联电网运行控制策略

在传统配电网中，网络大多以放射状运行，系统末端节点极易出现电压波动和越限问题；同时新能源分布和负荷水平存在地域性差异，采用 ER 实现区域间交直流电网的柔性互联，以及区域内配电系统馈线末端的互联，主要侧重于提升配电系统的总体电压水平，并且通过区域间能量互补，从而降低区域间互联系统的运行成本。

针对交直流互联系统，交流侧优化调度的控制变量和直流侧优化调度的控制变量不尽相同，需要分开考虑，ER 作为实现交直流互联的关键设备，其端口功率也需纳入控制变量，实现交直流系统的能量互济，对整体系统进行优化。因此在本文的优化模型中，考虑到 ER 与传统调节设备的相互配合，决策变量为 ER 各端口的有功和无功功率，OLTC 调节挡位、CB 投运组数、静止无功发生器(static var generator，SVG)出力、ESS 出力以及接入电网燃气轮机(gas turbine，GT)出力。为了突显能源之间的相互耦合，系统中 GT 和燃气锅炉(gas boiler，GB)共同供给热负荷，同时 GT 燃烧天然气后产生电能用于支撑配网。

为了应对 DG 和负载波动导致网损增加和电压越限问题，本文构建日前–日内双时间尺度的协调优化模型，具体分为：

1）日前长时间优化调度

在日前调度的决策变量中，综合考虑连续调节设备 ER、ESS、GT、SVG、GB 和离散调节设备 OLTC、CB 的协调优化调度，同时考虑到离散调节设备 OLTC 和 CB 受到安全问题和动作次数限制，无法连续快速调节，因此日前调度得到的 OLTC 和 CB 调度结果不再变化，而连续调节设备的调度结果需要根据日内动态调度进一步优化。

2）日内动态实时调度

在日内调度的决策变量中，连续调节设备 ER、ESS、GT 和 SVG 能够快速响应 DG 引起的电压波动，实时调节有功和无功潮流；GB 实时跟随 GT

的出力，保证热负荷供给平衡。

对于日前–日内双时间尺度的处理，在日前优化调度确定决策变量的调度结果后，根据 DG 和负荷的短时间波动，对日前连续调节设备的优化结果进行修正，实现实时调度，日前和日内调度协同配合，使电压保持在期望水平，使系统运行成本降到最低。

2 优化运行模型

由于 DG 和负荷的预测数据通常存在偏差，日前调度计划通常难以保证系统运行在最优状态，同时存在电压越限的风险，故需要加入日内短时间尺度优化以跟踪 DG 和负荷的波动，提高系统可靠性。

2.1 日前长时间尺度优化模型

2.1.1 配电网潮流约束

1）交流配电网潮流约束

交流配电网的 DistFlow 潮流模型[20]为

$$\begin{cases} P_{j,t}^{\text{inj}}+\sum\limits_{j:i\to j}\left(P_{ij,t}-r_{ij}I_{ij,t}^2\right)=\sum\limits_{k:j\to k}P_{jk,t} \\ Q_{j,t}^{\text{inj}}+\sum\limits_{j:i\to j}\left(Q_{ij,t}-x_{ij}I_{ij,t}^2\right)=\sum\limits_{k:j\to k}Q_{jk,t} \\ U_{i,t}^2-U_{j,t}^2=2\left(r_{ij}P_{ij,t}+x_{ij}Q_{ij,t}\right)-\left(r_{ij}^2+x_{ij}^2\right)I_{ij,t}^2 \\ I_{ij,t}^2U_{i,t}^2=P_{ij,t}^2+Q_{ij,t}^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_{j,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{inj}}$ 分别为节点注入有功和无功功率；$P_{ij,t}$、$Q_{ij,t}$、$I_{ij,t}$ 分别为支路 ij 的有功功率、无功功率和电流；r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗；$U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为节点 i、j 的电压；$j:i\to j$ 表示支路的起点为 i，终点为 j，功率的参考方向为起点 i 至终点 j。

2）直流配电网潮流约束

直流配电网的 DistFlow 潮流模型[20]为

$$\begin{cases} P_{j,t}^{\text{inj}}+\sum\limits_{j:i\to j}\left(P_{ij,t}-r_{ij}I_{ij,t}^2\right)=\sum\limits_{k:j\to k}P_{jk,t} \\ U_{i,t}^2-U_{j,t}^2=2r_{ij}P_{ij,t}-r_{ij}^2I_{ij,t}^2 \\ I_{ij,t}^2U_{i,t}^2=P_{ij,t}^2 \end{cases} \tag{3}$$

2.1.2 系统运行约束

在日前优化调度模型中，约束条件包括系统安全约束、决策变量约束以及 DG 运行约束，其中决策变量包括 CB 投切组数和 OLTC 挡位。

1）系统安全约束

$$(\underline{U}_i)^2\le U_{i,t}^2\le(\overline{U}_i)^2 \tag{4}$$

$$I_{ij,t}^2\le(\overline{I}_{ij})^2 \tag{5}$$

式中：$\underline{U}_i$ 和 $\overline{U}_i$ 分别为节点 i 的电压的下限和上限；$\overline{I}_{ij}$ 为支路 ij 的电流值上限。

2）CB 运行约束

$$\begin{cases} Q_{i,t}^{\text{CB}}=N_{i,t}^{\text{CB}}q_i^{\text{CB}} \\ \sum\limits_{t=1}^{T}\left|N_{i,t}^{\text{CB}}-N_{i,t-1}^{\text{CB}}\right|\le\lambda_{\max}^{\text{CB}} \\ 0\le N_{i,t}^{\text{CB}}\le\overline{N}^{\text{CB}},N_{i,t}^{\text{CB}}\in Z \end{cases} \tag{6}$$

式中：$Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为 CB 发出的无功功率；$N_{i,t}^{\text{CB}}$ 为节点 i 在时段 t 内电容投运组数，设为整数变量；$\overline{N}^{\text{CB}}$ 为最大投运组数；q_i^{CB} 为单组电容无功输出量；T 为调度周期(24 h)；$\lambda_{\max}^{\text{CB}}$ 为 CB 的日内动作次数上限；Z 表示整数。

3）OLTC 运行约束

$$\begin{cases} U_{i,t}=k_{ij,t}U_{j,t} \\ k_{ij,t}=k_{ij,t-1}+(K_{ij,t}-K_{ij,t-1})\Delta k_{ij} \\ \sum\limits_{t=1}^{T}\left|K_{ij,t}-K_{ij,t-1}\right|\le\lambda_{\max}^{\text{OLTC}} \\ -\overline{K}_{ij}\le K_{ij,t}\le\overline{K}_{ij},K_{ij,t}\in Z \end{cases} \tag{7}$$

式中：$k_{ij,t}$ 为 t 时段 OLTC 的变比；$K_{ij,t}$ 为 t 时段 OLTC 的抽头位置；Δk_{ij} 为 OLTC 的调压步长；$\overline{K}_{ij}$ 为 OLTC 的最大可调挡位；$\lambda_{\max}^{\text{OLTC}}$ 为 OLTC 的日内可调次数上限。

4）DG 运行约束

系统中 DG 的出力要满足一定的约束，即不能超出其允许出力的范围限制。

$$0\le P_{i,t}^{\text{DG}}\le P_{i,t}^{\text{DG,max}} \tag{8}$$

式中：$P_{i,t}^{\text{DG}}$ 为 DG 在 t 时段的出力；$P_{i,t}^{\text{DG,max}}$ 为 DG 的出力上限值。

2.2 日内短时间尺度优化模型

考虑到 DG 和负载的实时波动会导致电压越限问题，日内调度充分发挥连续调节设备的实时调节能力，在日前调度的步长内划分更短的时间步长进行实时优化，以应对 DG 和负载波动带来的干扰，消除电压越限。

2.2.1 配电网潮流约束

相比于日前调度，日内实时调度的潮流波动更大，越限风险更高，但潮流约束仍和日前调度保持一致，同式(2)、(3)。

2.2.2 系统运行约束

由于 OLTC 和 CB 受动作次数限制，不宜连续调节，相比于日前长时间尺度调度，日内短时间尺度调度的决策变量主要考虑了系统中连续可调节的设备，具体包括：SVG、ESS、GT、GB、ER 的功

率。系统安全约束同式(4)、(5)；ER 和 DG 的运行约束同式(1)和式(8)。

1）SVG 运行约束

SVG 作为连续无功调节装置，能有效应对 DG 的波动带来的电压越限问题。

$$Q_{i,\min}^{\mathrm{SVG}} \le Q_{i,t}^{\mathrm{SVG}} \le Q_{i,\max}^{\mathrm{SVG}} \tag{9}$$

式中：$Q_{i,t}^{\mathrm{SVG}}$ 为 SVG 的无功功率；$Q_{i,\min}^{\mathrm{SVG}}$ 和 $Q_{i,\max}^{\mathrm{SVG}}$ 分别为 SVG 吸收、发出无功功率的限值。

2）ESS 运行约束

$$\begin{cases} E_{i,t+1} = E_{i,t} + \left(\eta^{+} P_{i,t}^{\mathrm{ESS,in}} - P_{i,t}^{\mathrm{ESS,out}} / \eta^{-}\right)\Delta t \\ 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{ESS,in}} \le P_{i,\max}^{\mathrm{ESS,in}} X_{i,t}^{\mathrm{in}} \\ 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{ESS,out}} \le P_{i,\max}^{\mathrm{ESS,out}} X_{i,t}^{\mathrm{out}} \\ X_{i,t}^{\mathrm{in}} \in \{0,1\} \\ X_{i,t}^{\mathrm{out}} \in \{0,1\} \\ X_{i,t}^{\mathrm{in}} + X_{i,t}^{\mathrm{out}} \le 1 \\ E_{i,\min} \le E_{i,t} \le E_{i,\max} \\ E_{i,0} = E_{i,T} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$E_{i,t}$ 为 ESS 在时段 t 内的荷电量；$P_{i,t}^{\mathrm{ESS,in}}$ 和 $P_{i,t}^{\mathrm{ESS,out}}$ 为 ESS 充、放电功率；η^{+} 和 η^{-} 分别为 ESS 的充、放电效率；$X_{i,t}^{\mathrm{in}}$、$X_{i,t}^{\mathrm{out}}$ 分别为充放电状态的 0-1 变量；Δt 为调度时间间隔；$P_{i,\max}^{\mathrm{ESS,in}}$ 和 $P_{i,\max}^{\mathrm{ESS,out}}$ 分别为充、放电功率最大值；$E_{i,\max}$ 和 $E_{i,\min}$ 为荷电量的上、下限；考虑 ESS 运行的周期性，设定每个周期初始条件相同。

3）GT 运行约束

$$P_{\mathrm{GT},\min} \le P_{i,t}^{\mathrm{GT}} \le P_{\mathrm{GT},\max} \tag{11}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{GT}}$ 为 GT 在 t 时段的发电功率；$P_{\mathrm{GT},\max}$ 和 $P_{\mathrm{GT},\min}$ 分别为发电功率的上、下限。

4）GB 运行约束

$$Q_{\mathrm{GB},\min} \le Q_{i,t}^{\mathrm{GB}} \le Q_{\mathrm{GB},\max} \tag{12}$$

式中：$Q_{i,t}^{\mathrm{GB}}$ 为 GB 在 t 时段的发热功率；$Q_{\mathrm{GB},\max}$ 和 $Q_{\mathrm{GB},\min}$ 分别为发热功率的上、下限，其中当调度过程中 GB 的功率小于 $Q_{\mathrm{GB},\min}$ 时，认为 GB 不出力。

2.3 调度架构和优化目标

本文构建日前–日内双时间尺度的协调动态优化调度架构，包括日前长时间尺度调度和日内实时调度。在优化目标上，考虑到交直流互联电网的经济性和安全性，以综合成本和电压偏差为目标建立多目标运行优化模型。相比于归一化后的单目标中各部分的权重系数会对结果存在影响，Pareto 最优解集法能求解出模型的 Pareto 最优解集，便于决策者根据实际运行情况选取最优方案[21]。

1）运行成本最小

$$\min f_1 = f_{\mathrm{E}} + f_{\mathrm{G}} + f_{\mathrm{S}} + f_{\mathrm{O}} + f_{\mathrm{INV}} \tag{13}$$

式中：f_1 为 1 个调度周期内系统综合成本；f_{E} 为系统有功损耗成本，包括网络损耗和 ER 的有功损耗；f_{G} 为燃气机组运行成本；f_{S} 为开关操作成本，包括 OLTC 和 CB 的动作成本；f_{O} 为设备维护成本，包括 ER、ESS、SVG、GT 和 GB 的维护成本；f_{INV} 为折算到日的 ER 投资成本。具体计算式为：

$$f_{\mathrm{E}} = C_{\mathrm{e}} \left(\sum_{t=1}^{T} \sum_{ij \in \Omega_{\mathrm{O}}} r_{ij} I_{ij,t}^{2} \Delta t + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} L_{i,t}^{\mathrm{ER}} \Delta t \right) \tag{14}$$

$$f_{\mathrm{G}} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{C_{\mathrm{s}} P_{i,t}^{\mathrm{GT}}}{\eta_{\mathrm{e,GT}} L_{\mathrm{NG}}} + \frac{C_{\mathrm{s}} Q_{i,t}^{\mathrm{GB}}}{\eta_{\mathrm{h,GB}} L_{\mathrm{NG}}} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} f_{\mathrm{S}} = {} & \sum_{ij \in \Omega_{\mathrm{O}}} \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\mathrm{OLTC}} \left| K_{ij,t} - K_{ij,t-1} \right| \right) + \\ & \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\mathrm{CB}} \left| N_{i,t}^{\mathrm{CB}} - N_{i,t-1}^{\mathrm{CB}} \right| \right) \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} f_{\mathrm{O}} = {} & \frac{\eta}{365} \sum_{i=1}^{N_i} c^{\mathrm{ER}} S_i^{\mathrm{ER}} + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \omega P_{i,t}^{\mathrm{ESS}} + \\ & \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \xi Q_{i,t}^{\mathrm{SVG}} + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \sigma P_{i,t}^{\mathrm{GT}} + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \gamma Q_{i,t}^{\mathrm{GB}} \end{aligned} \tag{17}$$

$$f_{\mathrm{INV}} = \frac{1}{365} \frac{d(1+d)^{y}}{(1+d)^{y} - 1} \sum_{i=1}^{N_i} c^{\mathrm{ER}} S_i^{\mathrm{ER}} \tag{18}$$

式中：N_i 为节点数量；Ω_{O} 为线路集合；C_{e} 和 C_{s} 分别为电价和气价；$\eta_{\mathrm{e,GT}}$ 为 GT 的发电效率；$\eta_{\mathrm{h,GB}}$ 为 GB 的发热效率；L_{NG} 为天然气低拉热值，取 9.78 kWh/m^3；C_{OLTC} 和 C_{CB} 分别为 OLTC 动作成本系数和 CB 投切成本系数；c^{ER} 为 ER 的单位容量投资成本；η 为 ER 的年运行维护费用系数[19]；ω、ξ、σ 和 γ 分别为 ESS、SVG、GT 和 GB 的日运行维护费用系数；d 为贴现率，取 0.08；y 为 ER 的经济使用年限。

2）节点电压偏差最小

DG 与负载的波动、ER 的接入会影响系统电压分布，引入电压偏移度来描述系统的电压水平，以保证节点电压稳定在参考值附近。

$$\min f_2 = \frac{1}{N_i} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_i} \left| \left(U_{i,t}^{*} \right)^2 - 1 \right| \tag{19}$$

式中：f_2 为电压偏移度，由节点电压的标幺值和参考值的平方差的平均值构成；$U_{i,t}^{*}$ 为 t 时段节点 i 的电压标幺值，其中取网络额定电压作为基准值。

3 模型求解

现有的文献大多采用智能算法或者采用以二阶锥规划为代表的凸优化算法进行求解，由于本文为多目标问题，需要从 Pareto 解集中根据实际需要选取最优解，而二阶锥规划难以处理多目标优化问题，并且多目标问题通过加权转化为单目标问题时难以确定最佳权重。因此，本文拟采用较为成熟的多目标智能算法来求解本文模型。

与其他启发式方法相比，MOPSO 具有很强的搜索能力，不易陷入局部最优[22-23]；同时其更新方程简单，更容易应用到复杂的问题中[24]。鉴于此，本文提出了一种改进的 MOPSO 求解本文模型。

3.1 编码方案

基于 ER 的交直流互联电网有功–无功协调动态优化问题的决策变量分为离散变量和连续变量。离散变量包括 OLTC 调节挡位、CB 投运组数；连续变量包括 ER 端口功率、ESS 充放电功率、GT 和 GB 出力、SVG 补偿功率；决策变量的矩阵为实数和整数混合编码，即

$$\boldsymbol{P}_t=[\boldsymbol{K}_t^{\mathrm{O}}\ \boldsymbol{N}_t^{\mathrm{C}}\ \boldsymbol{P}_t^{\mathrm{E}}\ \boldsymbol{P}_t^{\mathrm{ER}}\ \boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{ER}}\ \boldsymbol{P}_t^{\mathrm{GT}}\ \boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{GB}}\ \boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{S}}] \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{P}_t$ 为 t 时段的决策变量矩阵；$\boldsymbol{K}_t^{\mathrm{O}}$、$\boldsymbol{N}_t^{\mathrm{C}}$ 分别为 OLTC 挡位、电容投切组数矩阵，均为离散变量；$\boldsymbol{P}_t^{\mathrm{E}}$、$\boldsymbol{P}_t^{\mathrm{ER}}$、$\boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{ER}}$、$\boldsymbol{P}_t^{\mathrm{GT}}$、$\boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{GB}}$、$\boldsymbol{Q}_t^{\mathrm{S}}$ 分别为 ESS 功率、ER 端口有功功率和无功功率、GT 和 GB 出力以及 SVG 补偿功率矩阵，均为连续变量。对于每个决策变量矩阵，均有

$$\boldsymbol{M}_t^k=[m_{1,t}^k\ \ m_{2,t}^k\ \ \cdots\ \ m_{n,t}^k] \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{M}_t^k$ 表示式(17)中 8 类决策变量中的第 k 类；$m_{n,t}^k$ 表示第 k 类决策变量矩阵中第 n 个设备的运行状态。

传统的 MOPSO 算法一般采用如式(21)所示的实数编码，此时 1 个粒子只能对应解空间中的 1 个位置，对于式(21)中的实数变量，本文采用概率幅作为粒子的当前位置编码，如下：

$$\boldsymbol{S}_t^k=\begin{vmatrix}\cos\theta_{1,t}^k & \cos\theta_{2,t}^k & \cdots & \cos\theta_{n,t}^k\\ \sin\theta_{1,t}^k & \sin\theta_{2,t}^k & \cdots & \sin\theta_{n,t}^k\end{vmatrix} \tag{22}$$

$$\begin{cases}m_{n,t,c}^k=\dfrac{b_n^k}{2}\left(1+\cos\theta_{n,t}^k\right)+\dfrac{a_n^k}{2}\left(1-\cos\theta_{n,t}^k\right)\\ m_{n,t,s}^k=\dfrac{b_n^k}{2}\left(1+\sin\theta_{n,t}^k\right)+\dfrac{a_n^k}{2}\left(1-\sin\theta_{n,t}^k\right)\end{cases} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{S}_t^k$ 为改进编码的矩阵；$\cos\theta_{n,t}^k$、$\sin\theta_{n,t}^k$ 分别为 $m_{n,t}^k$ 对应的余弦和正弦位置编码；a_n^k、b_n^k 分别为第 k 类决策变量中第 n 个设备出力的最大值和最小值；$m_{n,t,c}^k$、$m_{n,t,s}^k$ 分别为余弦和正弦转化至实数空间对应的位置，此时改进编码后的粒子同时占据解空间中的 2 个位置，扩展了对解空间的遍历性，能够提高算法的搜索能力。

3.2 改进的多目标粒子群算法

根据概率优化算法的特点，将考虑概率优化思想的概率化粒子群算法应用于求解复杂协调优化的多目标问题是非常合适的，其更新方程如下：

$$X_e^{x+1}=P_e^x\pm\beta^x\left|M_e^x-X_e^x\right|\ln(\frac{1}{u}) \tag{24}$$

$$P_e^x=\varphi R_e^x+(1-\varphi)G_e^x \tag{25}$$

$$M_e^x=\frac{1}{N_e}\sum_{e=1}^{N_e}R_e^x \tag{26}$$

式中：X_e^x 为粒子 e 在第 x 次迭代的位置；M_e^x 为种群中所有粒子个体最优位置的平均值；R_e^x 和 G_e^x 分别为粒子的局部最优位置和全局最优位置；P_e^x 为粒子 e 第 x 次迭代的局部吸引因子；β^x 为收缩–扩张因子，通常线性减小；N_e 为种群粒子个数；φ 和 u 为[0,1]上的随机数。

本文将概率化粒子群算法的更新思想和多目标求解思想相结合，利用粒子间的支配关系，寻找出历史最优解，并结合 Pareto 排序机制更新非劣解集。相应地，在多目标问题中，对于式(24)、(25)，可用 D_e^x 替换 M_e^x 和 G_e^x，同时用 R_e^x 替换 X_e^x。改进 MOPSO 的更新式如下：

$$X_e^{x+1}=P_e^x\pm\beta^x\left|D_e^x-R_e^x\right|\ln(\frac{1}{u}) \tag{27}$$

$$P_e^x=\varphi R_e^x+(1-\varphi)D_e^x \tag{28}$$

式中，D_e^x 为引导粒子，为了增加 Pareto 解集的宽度，可以依概率在极端粒子(距离坐标原点最远)和最近粒子(距离坐标原点最近)中随机选择，也可以根据拥挤成度，选择拥挤度低的粒子[25]。

3.3 求解流程

采用改进 MOPSO 求解基于 ER 的交直流互联电网有功–无功协调动态优化模型的步骤，如下所述。

1）将 DG、调节设备、ER 接入系统中，输入 DG 的日前预测数据、实时波动数据、决策变量参数范围，输入配电网和 MOPSO 算法初始参数。

2）在约束条件下，利用式(22)初始化粒子种群，计算潮流，得到目标函数值，并根据粒子间支配关系

得到 Pareto 最优解集，并在 Pareto 解集中选取 D_e^x 。

3）采用式(27)和式(28)更新粒子与 Pareto 最优解集；通过式(23)返回实数编码粒子；对于约束处理，如果在生成粒子时获得不可行解，则丢弃该解并生成新的可行解来替换它。

4）当 Pareto 最优解集超过一定规模时，则根据自适应网格法进行清除，拥挤度越高，被清除的概率越高，防止产生粒子簇[19]。

5）根据模型收敛情况，设定最大迭代次数 200 次，在达到预设的最大迭代次数后，输出 Pareto 最优解集，得到 1 组调度方案；若未达到，则返回步骤 2。

4 算例分析

4.1 算例系统

本文使用改进的 IEEE 33 节点交流配电网和 13 节点直流配电网来验证基于 ER 的交直流互联电网协调动态优化的有效性，如图 2 所示。

系统的调度周期为 24 h，日前优化调度时间步长为 1 h，日内实时优化调度时间步长为 5 min。为了贴近实际配电网负荷复杂多变的情况，区域 1 接入居民区负荷，区域 2 接入工业重负荷和电–热–气综合能源系统，区域 3 接入直流负荷和电动车充电桩。考虑到新能源的区域性差异及 DG 高渗透对配电系统的影响，区域 1 和区域 3 新能源资源丰富，区域 2 新能源较为匮乏。所有 DG 根据时序出力特性设置最大跟踪功率值，定功率因数设为 1，不考虑 DG 的局部无功支撑[3]。基本安装参数见附录 A 表 A1，参数和特征曲线详见附录 A 图 A1。

无功调节设备 OLTC、CB 和 SVG 的设备相关参数见附录 A 表 A2[19]。ER 的 5 个端口别连接 18、33、58、51 和 67 节点，容量为 5000 kVA，端口无功功率的限制为 500 kVA，且每个端口变流器的损耗系数为 0.01[26]，单位容量投资费用为 900 元，年运行维护系数为 0.01，经济使用年限为 20 a。天然气价格为 1.5 元/m^3，综合能源系统中 GT 和 GB 的参数如附录 A 表 A3 所示；区域 3 的节点 68 和节点 71 接入容量为 2 MWh 的 ESS，充放电的功率上限和效率分别是250 kW和0.95，维护成本为0.04 元/kWh。本文设定电价为 0.4 元/kWh，系统电压标幺值的期望范围设置为 0.97~1.03，其基准值为网络额定电压。

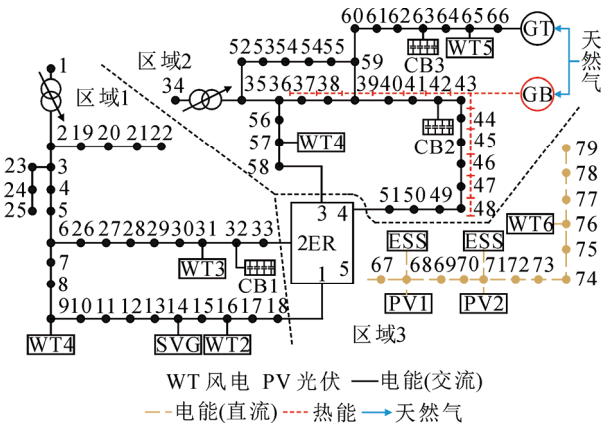


图 2 含 ER 的交直流电网结构图

Fig.2 Structure diagram of AC/DC grid with ER

本算例设置了 3 种运行场景对基于 ER 的交直流互联电网协调优化策略性能进行对比分析。

场景 1：考虑 ER 和 GT、GB、ESS、无功调节装置的有功–无功协调动态优化。

场景 2：仅考虑 GT、GB、ESS、无功调节装置进行有功–无功优化。

场景 3：不考虑优化的原始系统。

4.2 日前有功–无功优化结果分析

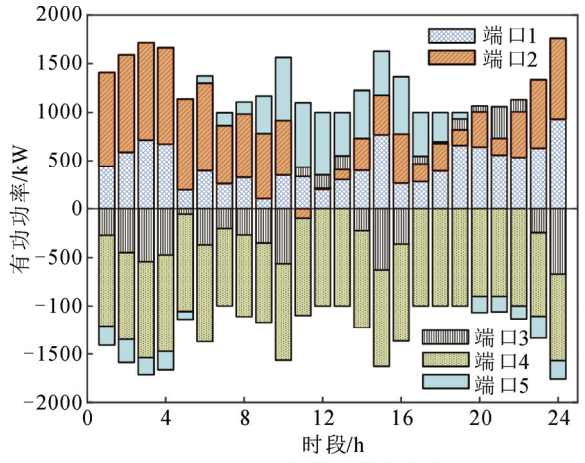
4.2.1 ER 与调节设备协调运行分析

1）ER 端口功率分析

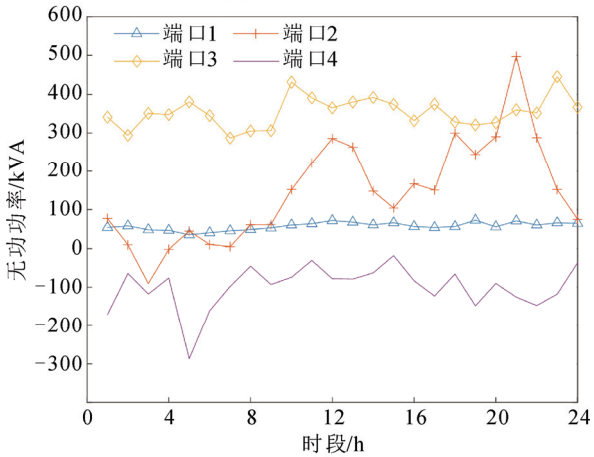
图 3 为场景 1 中 ER 端口的有功和无功功率情况，有功功率正为流入端口，负为流出端口。

可以看出 ER 的运行策略和各个区域的供电和需求特性是一致的，新能源丰富的区域 1 持续将功率传输给负荷重的区域 2，以满足区域 2 的功率需求，特别是在风电功率充足的夜晚，ER 传输功率较大，端口 1 和端口 2 主要为输送功率，端口 4 主要为吸收转供功率，端口 3 所连节点电压水平较高，可以根据系统需要灵活调节功率，端口 5 所连的直流配网在晚上负荷高峰时接纳功率，白天光伏出力大时输送功率，基于 ER 互联的系统实现了各区域电网间相互支撑，能量互济。

无功功率正为发出无功，负为吸收无功，可以看出，端口 1 由于电压水平较高，无功补偿量很小；端口 2、3 的无功输出和 DG、负荷的变化规律基本一致，在负荷高峰发出较多的无功功率；端口 4 由于接收的有功抬升了馈线电压，因此相应的端口 4 在一定程度上吸收无功功率以防止电压越限，总体而言，各交流端口在电压水平低时补偿无功，在电压升高时吸收无功，维持电压在期望范围。



(a) ER各端口有功功率



(b) ER各端口无功功率

图 3 ER 端口功率情况

Fig.3 Power situation of ER

2）ER 与有功调节设备协同运行分析

附录 B 图 B1 为各场景下有功调节设备 ESS 和 GT 的运行情况，场景 1 中，ER 配合多个常规调节设备，调节系统的有功和无功潮流，及时响应电压波动。与场景 2 相比，区域 3 的 ESS 与 ER 相互配合，DG 出力大时，多余的功率优先供给其他区域，然后再与 ESS 交互，此时 ESS 不再满充满放，降低了直流配网对 ESS 的配置要求和 ESS 的运行维护成本，使 ESS 实现更灵活主动的功率控制。在场景 2 中由于馈线末端电压降落严重，为了抬升线路电压，减轻负荷压力，区域 2 中 GT 出力功率维持在较高水平；在场景 1 中，其他区域通过 ER 支撑区域 2 的重负荷，减轻 GT 的有功支撑压力，降低了 GT 的出力。

3）ER 与无功调节设备协调运行分析

附录 B 图 B2 和 B3 为各场景下无功调节设备、CB、SVG 和 OLTC 的运行情况，对于无功补偿装置，区域 1 中新能源渗透率高，电压水平较高，因此 CB 的投切组数较少；而区域 2 负荷较重，且调节手段有限，CB 投切组数较多，且补偿效果有限。相比于场景 2，在场景 1 中 ER 接入后，各区域相互协调，补偿需求压力减弱，从而避免了 OLTC 和 CB 的频繁动作，有效降低了系统运行的安全风险。同时场景 1 中 CB 投切组数和 SVG 出力均有所减少。ER 的接入平衡了各馈线的潮流，缓解了各个区域的无功补偿压力，释放了无功补偿装置的补偿容量，提高了其补偿裕度，以应对突发情况下灵活的无功支撑，实现更主动、更灵活的无功治理策略。

4.2.2 电压和系统运行成本分析

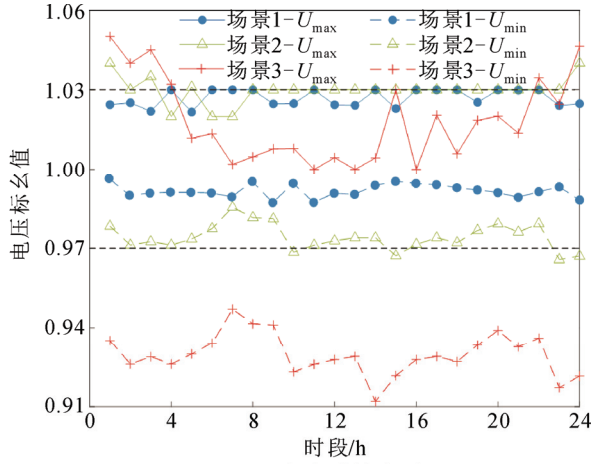
图 4 为调度周期内系统的电压及网损分布。

对于交流系统，如图 4(a)所示，由于高比例的新能源接入系统，场景 3 中原始网络的最高电压存在波动和越上限情况，最低电压由于无功支撑不足存在越下限情况；相较于此，场景 2 中增加有功和无功调节设备，能在大部分时刻将电压标幺值控制在 0.97~1.03 的期望范围内，在少部分时刻由于传统调节设备能力有限，仍然存在部分节点电压越限情况；与其他 2 种场景相比，场景 1 基于 ER 实现了有功–无功协调动态优化。电压标幺值控制在 0.97~1.03 的期望范围内，使馈线的电压曲线变平。当发生电压越限时，各种有功和无功调节装置相互配合，有效消除电压越限，提高了馈线末端的电压水平。对于直流系统，如图 4(b)所示，3 个场景中均没有出现电压越限的情况，在场景 2 和场景 3 中，由于功率的调节手段有限，导致系统电压存在一定程度的波动；而在场景 1 中，ER 的接入丰富了功率调节手段，降低了电压的波动幅度，使系统在接纳新能源方面具有更强的适应性，提升了系统的安全稳定裕度。

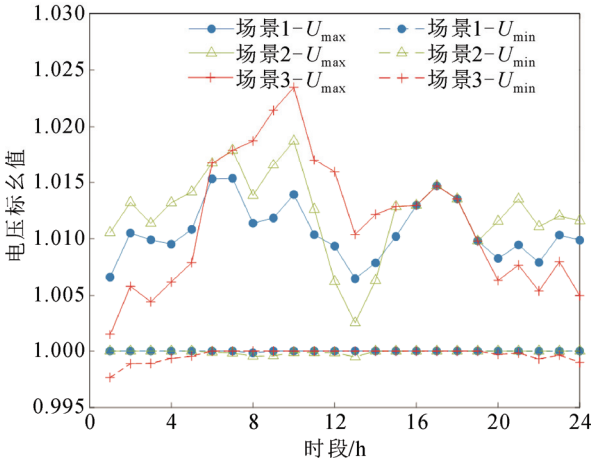
图 4(c)表明了各场景的网损情况，在原始网络中，DG 的大量接入会加剧传统配网的负荷峰谷差，造成系统网损升高，电压越限；场景 2 相比于场景 3，降低了各时段的网络损耗，但是系统的运行仍然受 DG 和负载波动的影响，在某些时段网损较大。而场景 1 中 ER 协同传统调节设备运行，此时系统几乎不受 DG 和负载波动的影响，进一步降低了全天内网络损耗值，降损效果明显。综上可知，基于 ER 互联的系统，降低了系统网损，提升了电能质量。

3 种场景的运行优化结果如表 1 所示，电网运行成本包括有功损耗成本、开关成本和设备维护成

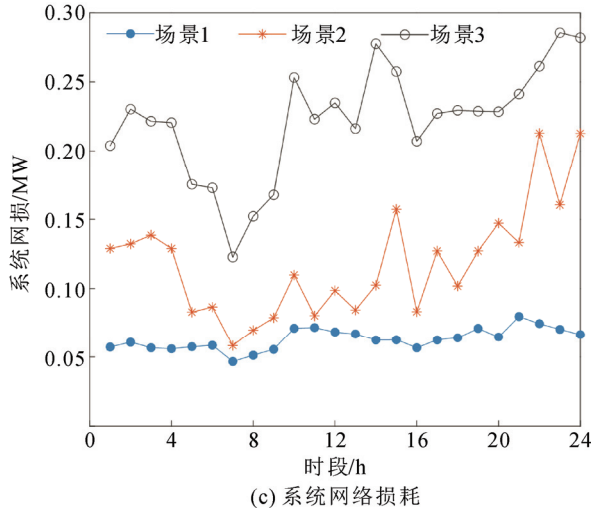
本，结果表明，相比于场景 2 和 3，在场景 1 中，虽然加入了 ER 的损耗成本，但 ER 的加入大幅降低了有功网损、开关成本以及设备维护成本，总运营成本降低最为显著，降低了 25.4%，电压偏移度最小；场景 2 储能容量有限，运行成本较高，且电能质量提升有限；场景 3 中网损电压偏移程度都比较大，不能保证供电可靠性和经济性。基于上述分析，ER 的接入可以提升系统电能质量，降低系统运行成本，保证配电网的安全性和经济性。



(a) 交流系统电压



(b) 直流系统电压



(c) 系统网络损耗

图 4　系统电压和有功损耗

Fig.4　System voltage and active power loss

4.3　日内有功−无功优化结果分析

4.3.1　实时动态调度分析

为了探究双时间尺度下连续设备的动态调节作用，以新能源高渗透的区域 1 为例，在 11:00—12:00，DG 的波动如附录 C 图 C1 所示，在日前调度确定离散调节设备的调度结果后，为了快速响应 DG 引起的波动，ER 和系统中的连续调节设备每隔 5 min 动态控制其功率的流动，各个设备的功率调节如附录 C 图 C2 所示，有功和无功调节跟随 DG 波动，维持系统电压稳定；图 5 为日内实时调度前后系统末端节点电压波动情况，可以看出仅进行日前调度时，系统末端节点的电压随着 DG 的波动存在越限情况；进行日内实时调度后，配电网的电能质量有所提升，不再越限。可见在双时间尺度下，日内实时调度能弥补离散调节设备在调节能力上的不足，在较短时间范围内进行有功–无功调节，有效抑制新能源并网带来的电压波动问题。

4.3.2　新能源接纳能力分析

双时间尺度的调度架构，可以调动连续调节设备实时跟踪新能源产生的波动，为了探究 ER 的实

表 1　各场景运行优化结果

Table 1　Optimization results of each scenario

场景	运行成本/(元·d^{-1})					电压偏移度
	网损	ER 损耗	开关操作	设备维护	总成本	
1	605.27	269.14	29.21	684.11	1587.61	0.23
2	1137.44	0	108.80	943.29	2189.53	0.58
3	2129.05	0	0	0	2129.05	1.01

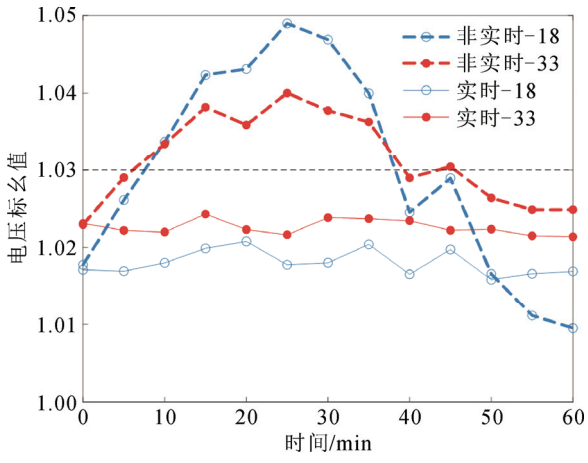


图 5　系统末端 18、33 节点电压

Fig.5　18 and 33 node voltage at the end of the system

时调节对电网新能源接纳能力的影响，研究了区域1在不同新能源渗透率下的电压和网损情况，如表2所示。

新能源渗透率比较低时，3个场景下系统均可以消纳新能源来平抑负荷，降低系统网损。新能源渗透率从30%提升至50%时，新能源的接入可以降低系统网损，减小电压偏移程度。随着新能源渗透率的提高，传统的配电系统无法消纳大量的新能源，造成系统网损升高，电能质量下降。在场景2和场景3中，电压偏移度和网损均随新能源渗透率的升高而大幅增加，影响系统的安全稳定运行；而场景1由于ER的接入，在新能源渗透率较高时，电压偏移度为场景2的29.5%，网损为场景2的41.1%，此时场景1中的系统可以保证供电可靠性，提升系统接纳新能源的能力。综上，双时间尺度的调度架构下，ER的实时调节可以进一步平衡区域间功率流动，降低新能源接入对电网的不利影响。

4.4 故障隔离和优化重构分析

为了进一步探究ER在交直流互联配电网中发挥运行优化的优势，对ER在电网故障情况下的电压优化和网络重构进行了仿真分析，如附录D。

4.5 ER经济效益分析

场景1和场景2下的经济效益分析见表3，ER在互联系统中的应用将优化系统的运行，包括降低有功损耗、改善电压分布、提高DG的利用率、提升调节设备功率裕度。因此相比于场景2，场景1中的设备维护、损耗成本均有所降低。对于燃气机组运行成本，如附录B图B1和B4所示，在场景2区域2的电–热–气综合能源系统中，GT出力大，消耗天然气较多；在场景1中，ER互联促进电网间能量互济，减轻了GT的支撑压力，从而降低了GT的天然气耗量；此时需要GB增加出力以满足热负荷的需求，GB的天然气消耗增加；由于在产热方面GB的天然气利用率高于GT，因此综合而言，ER的加入降低了天然气的消耗，从而降低了燃气机组运行成本。

从表3可以看出，场景1具有较好的经济效益。与场景2相比，综合运行成本减少了10.3%，随着电力电子器件成本的不断降低，ER带来的经济效益将更加明显。

4.6 算法性能分析

为了验证本文算法的有效性，分别采用改进MOPSO和成熟的多目标算法NSGA-Ⅱ求解场景1中的优化模型，其中每个算法各进行200次仿真，结果如附录E图E1所示，可以看出，NSGA-Ⅱ获得的Pareto前沿完全由改进MOPSO的结果所支配，同时，改进MOPSO提升了Pareto前沿的分布广度，相比于NSGA-Ⅱ可以提供更全面的决策参考范围。

附录E表E1显示了不同场景下，各个时间断面下的模型求解时间，可以看出，MOPSO和NSGA-Ⅱ的求解时间相差不大。在单个时间断面下，场景1相比于场景2涉及变量更多，求解时间更长，但相对于1 h和5 min的时间尺度，该求解时间仍属于秒级范围，可以保证较快的求解速度。

表2 不同新能源渗透率下优化结果分析

Table 2 Analysis of optimization results with different penetration of renewable energy

渗透率/%	场景1		场景2		场景3	
	电压偏移	网损/kWh	电压偏移	网损/kWh	电压偏移	网损/kWh
30	0.12	650.99	0.21	798.69	0.49	1726.55
50	0.09	505.03	0.14	528.46	0.38	1408.78
70	0.11	571.53	0.19	722.69	0.41	1580.16
90	0.13	693.69	0.44	1687.92	0.61	2129.05

表3 经济效益分析

Table 3 Economic benefit analysis

场景	运行成本/元				
	设备维护成本	有功损耗成本	燃气机组运行成本	ER投资成本	综合成本
1	713.21	874.41	9734.71	1255.71	12 578.04
2	1052.09	1137.44	11 830.13	0	14 019.66
对比	–338.88	–263.03	–2095.42	+1255.71	–1441.62

5 结论

本文提出了一种基于ER的交直流互联电网协调动态优化模型及调度方法，以提升配电系统的经济性和供电可靠性。在优化模型中综合考虑了ER和调节设备的协同作用以及DG的实时波动特点，建立了日前–日内双时间尺度动态优化模型，并提出一种改进MOPSO算法求解该模型，结论如下：

1）ER可以协调各区域线路的功率需求，改善潮流分布，有效降低系统有功损耗，提升馈线末端电压水平，缓解各区域有功和无功功率的支撑压力，优化有功和无功调节设备的补偿裕度，提高设备的灵活性；在双时间尺度的调度架构下，ER和连续调节设备可以实时跟踪DG和负荷的波动，保证电

压在期望范围内。

2）通过 ER 和有功调节设备协同运行，可以提升电网对新能源的接纳能力，适应新能源大规模并网的发展趋势；在故障情况下，ER 可以实现功率的灵活转供，提升电力系统供电可靠性。

3）对于本文模型，NSGA-Ⅱ获得的 Pareto 前沿完全由改进 MOPSO 的结果所支配，同时，改进 MOPSO 具有更宽的 Pareto 前沿和更高的效率。

在本文模型中，ER 接入交直流电网实现了各区域的能量互济，在优化运行方面具有较好的效果；除了以电能为主的协调控制外，在未来的研究中，可以考虑多种能源通过 ER 协调配合，进一步挖掘能源互联网的特性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 马 钊，周孝信，尚宇炜，等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报，2015，35(6)：1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.

[2] 瞿合祚，李晓明，杨玲君，等. 考虑负荷和分布式电源时变性的配电网多目标动态重构和 DG 调度[J]. 高电压技术，2019，45(3)：873-881.
QU Hezuo, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. Multi-objective distribution network dynamic reconfiguration and DG control considering time variation of load and DG[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 873-881.

[3] 符 杨，张智泉，李振坤. 基于二阶段鲁棒优化模型的混合交直流配电网无功电压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(16)：4764-4774.
FU Yang, ZHANG Zhiquan, LI Zhenkun. Research on reactive power voltage control strategy for hybrid AC/DC distribution network based on two-stage robust optimization Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4764-4774.

[4] 马 鑫，郭瑞鹏，王 蕾，等. 基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化，2018，42(22)：144-150.
MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144-150.

[5] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.

[6] XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy Internet[C]// 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels, Belgium: IEEE, 2011: 31-36.

[7] LIU B, PENG Y W, XU J C, et al. Design and implementation of multiport energy routers toward future energy internet[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1945-1957.

[8] 仇书山，毛承雄，马春艳，等. 基于能源路由器的配电网与综合能源微网群协同运行优化[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5024-5036.
QIU Shushan, MAO Chengxiong, MA Chunyan, et al. Cooperative operation optimization of distribution network and multi-microgrid integrated energy system based on energy router[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5024-5036.

[9] 盛万兴，段 青，孟晓丽，等. 电力电子化进程下的交直流无缝混合灵活配电系统研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(7)：1877-1888.
SHENG Wanxing, DUAN Qing, MENG Xiaoli, et al. Research on the AC&DC seamless-hybrid fluent power distribution system following the power electronics evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1877-1888.

[10] 沙广林，刘 斌，邬玮晗，等. 多端柔性互联的交直流配电系统分层控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3509-3520.
SHA Guanglin, LIU Bin, WU Weihan, et al. Hierarchical control strategy for multi-terminal flexible interconnected AC/DC power distribution systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3509-3520.

[11] LIU W L, LIAO J, HONG Y Q, et al. Control strategy of energy routers for AC/DC hybrid distribution network with closed loop operation in short time scale[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Power and Renewable Energy. Shanghai, China: IEEE, 2020: 366-371.

[12] LIU B, WU W H, ZHOU C X, et al. An AC-DC hybrid multi-port energy router with coordinated control and energy management strategies[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109069-109082.

[13] MIAO J Q, ZHANG N, KANG C Q, et al. Steady-state power flow model of energy router embedded AC network and its application in optimizing power system operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4828-4837.

[14] 郭 靖，李可军，王景山，等. 含能源路由器的交直流网络潮流计算模型及可行解求取[J]. 电力系统自动化，2018，42(13)：85-93.
GUO Jing, LI Kejun, WANG Jingshan, et al. Power flow calculation model and feasible solution of AC-DC network with energy routers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 85-93.

[15] HUANG L, ZONG C X, YANG X, et al. Power flow calculation of distribution network with multiple energy routers[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23489-23497.

[16] SHEN Y, ZHU F J, ZHANG C P, et al. Steady-state model of multi-port electric energy router and power flow analysis method of AC/DC hybrid system considering control strategies[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2794-2799.

[17] YANG C, YU J L, ZHENG W M, et al. Daily economic optimal dispatch of energy router considering the voltage of distribution network[C]//Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2018: 1-6.

[18] YUE J P, CAI S B, XIE N, et al. Research on distribution network topology and energy management considering energy router port interconnection[C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Wuhan, China: IEEE, 2020: 3636-3640.

[19] 张忠会，雷大勇，李 俊，等. 基于自适应 ε-支配多目标粒子群算法的含 SOP 的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术，2022，46(6)：2199-2212.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ε-dominating multi-objective

particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2212.

[20] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2565-2572.

[21] 刘梦依，邱晓燕，张志荣，等. 计及风光出力相关性的配电网多目标无功优化[J]. 电网技术，2020，44(5)：1892-1899.
LIU Mengyi, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network considering output correlation between wind turbines and photovoltaic units[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1892-1899.

[22] MOHD ZAIN M Z B, KANESAN J, CHUAH J H, et al. A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on dynamic boundary search for constrained optimization[J]. Applied Soft Computing, 2018, 70: 680-700.

[23] LI L, WANG W L, XU X L. Multi-objective particle swarm optimization based on global margin ranking[J]. Information Sciences, 2017, 375: 30.

[24] RAHIMI S, ABDOLLAHPOURI A, MORADI P. A multi-objective particle swarm optimization algorithm for community detection in complex networks[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 39: 297-309.

[25] MOSTAGHIM S, TEICH J. Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO)[C]// Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indianapolis, America: IEEE, 2003: 26-33.

[26] 姚宗强，赵长伟，马世乾，等. 含多端 SOP 的智能配电网运行优化及示范应用[J]. 电力系统及其自动化学报，2018，30(12)：66-72.
YAO Zongqiang, ZHAO Changwei, MA Shiqian, et al. Operation and optimization of smart distribution network with multi-terminal soft open point and pilot application[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 66-72.



仇书山
1997—，男，硕士生
主要从事能源路由器及综合能源系统优化调度方面的研究工作
E-mail: shushanqiu@hust.edu.cn

QIU Shushan

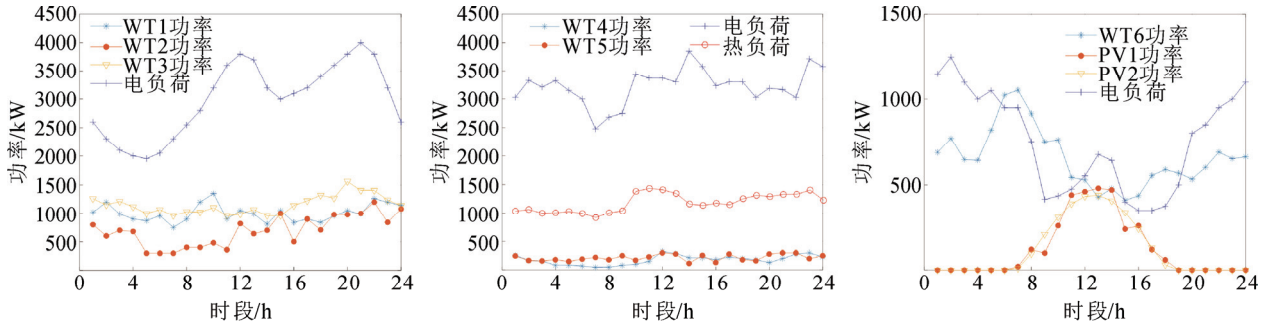


王　丹(通信作者)
1977—，男，博士，教授
主要从事电力系统运行控制和新能源并网方面的研究工作
E-mail: wangdan@mail.hust.edu.cn

WANG Dan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-01-21　在线出版日期　2022-04-26　　编辑　程子丰

附录 A



(a) 区域1　(b) 区域2　(c) 区域3

图 A1　各区域典型日负荷曲线

Fig.A1　Typical daily load curve in each region

表 A1　分布式电源配置参数

Table A1　Parameters of DGs

设备	设备参数	
	安装位置	容量/kVA
风电机组	16	1200
	9、31	1500
	57、65	500
光伏系统	68、71	500

表 A2　OLTC、CB 和 SVG 相关参数

Table A2　Parameters of OLTC,CB and SVG

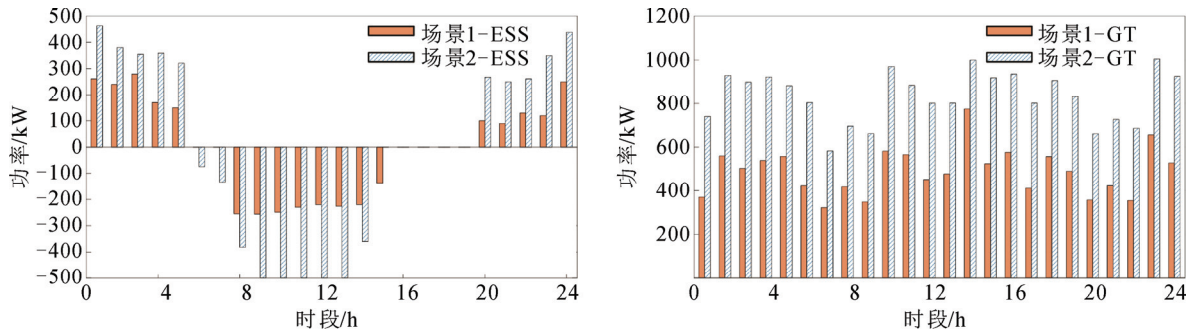
设备	设备参数				
	安装位置	无功容量/kVA	调整能力	最大调整次数	动作/维护成本
OLTC	1-2、34-35	—	10 档 (1%)	8	9.8 元/次
CB	32、42、63	7×150	—	8	1.6 元/次
SVG	14	±500	—	—	0.68 元/MVA

表 A3　GT 和 GB 相关参数

Table A3　Parameters of GT and GB

设备	容量/kW	维护成本/(元·kWh^{-1})	效率/%	功率上(下)限/kW
GT	1000	0.03	电: 28，热: 54	1000(10)
GB	1000	0.02	90	1000(10)

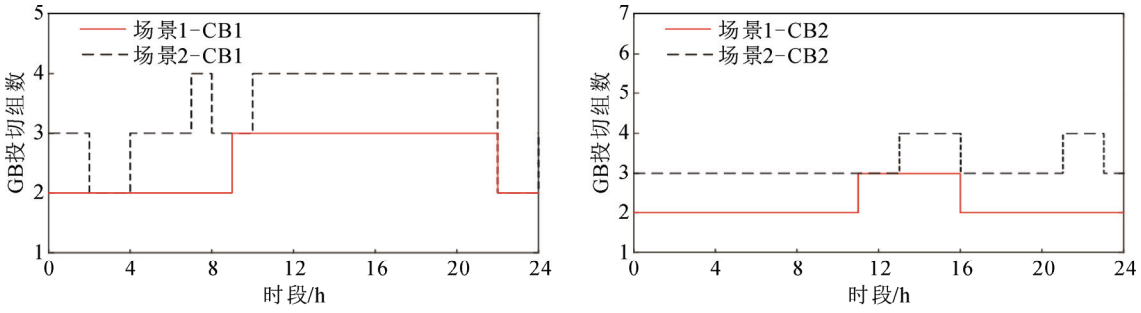
附录 B



(a) ESS出力情况　(b) GT出力情况

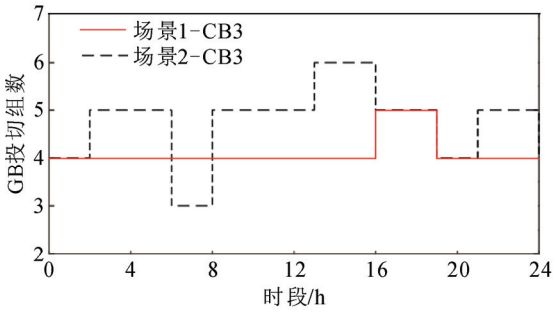
图 B1　ESS 和 GT 出力情况

Fig.B1　The output of ESS and GT

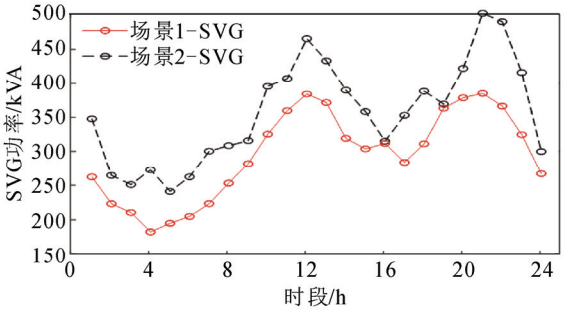


(a) CB1投切情况

(b) CB2投切情况



(c) CB3投切情况



(d) SVG出力情况

图 B2　CB 投切及 SVG 出力情况

Fig.B2　CB switching and SVG compensation

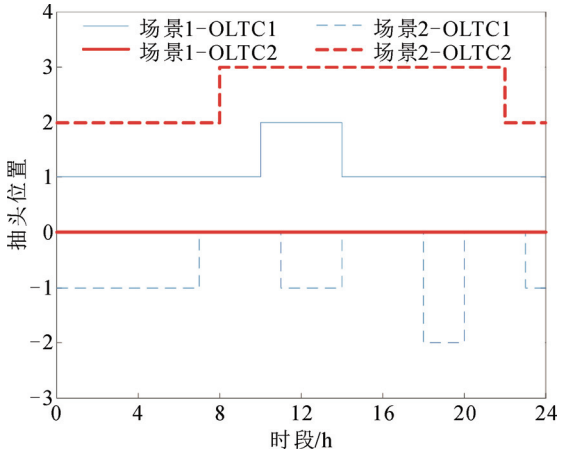


图 B3　OLTC 调节挡位

Fig.B3　Tap movements of the OLTC

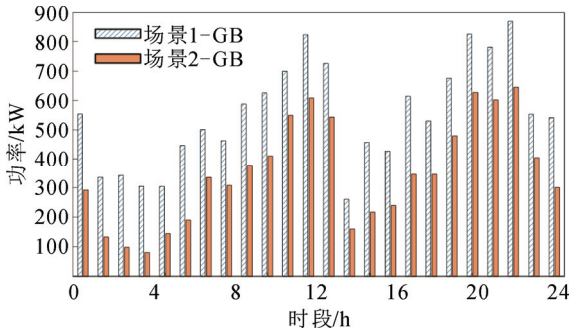


图 B4　GB 出力情况

Fig.B4　The output of GB

附录 C

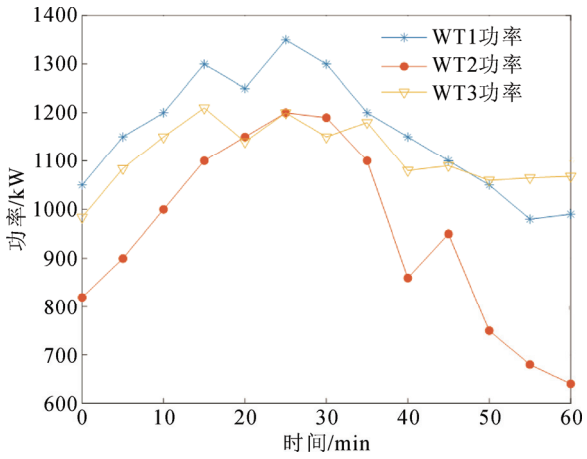
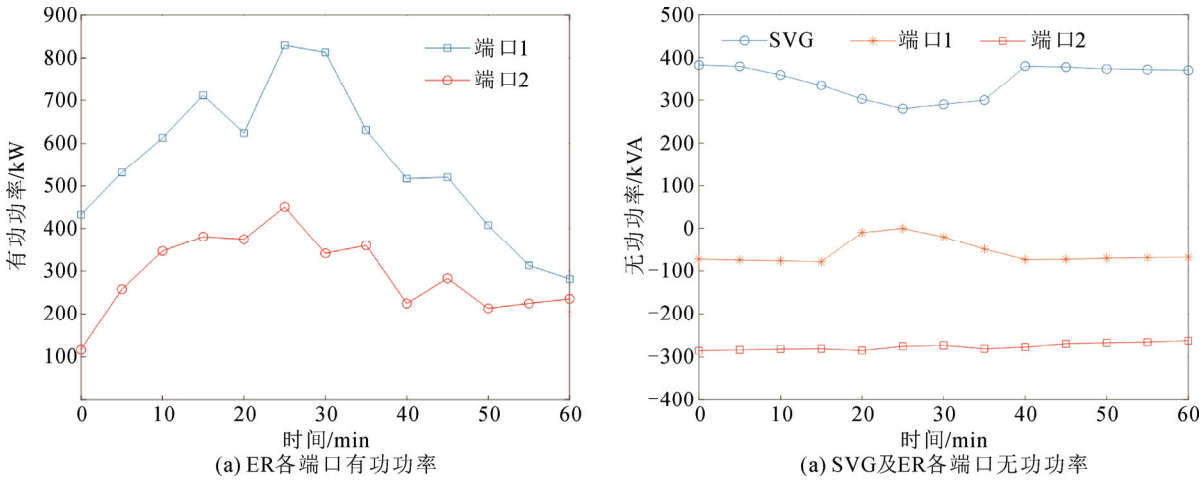


图 C1　一小时内 DG 出力波动

Fig.C1　DG outputs fluctuation in one hour



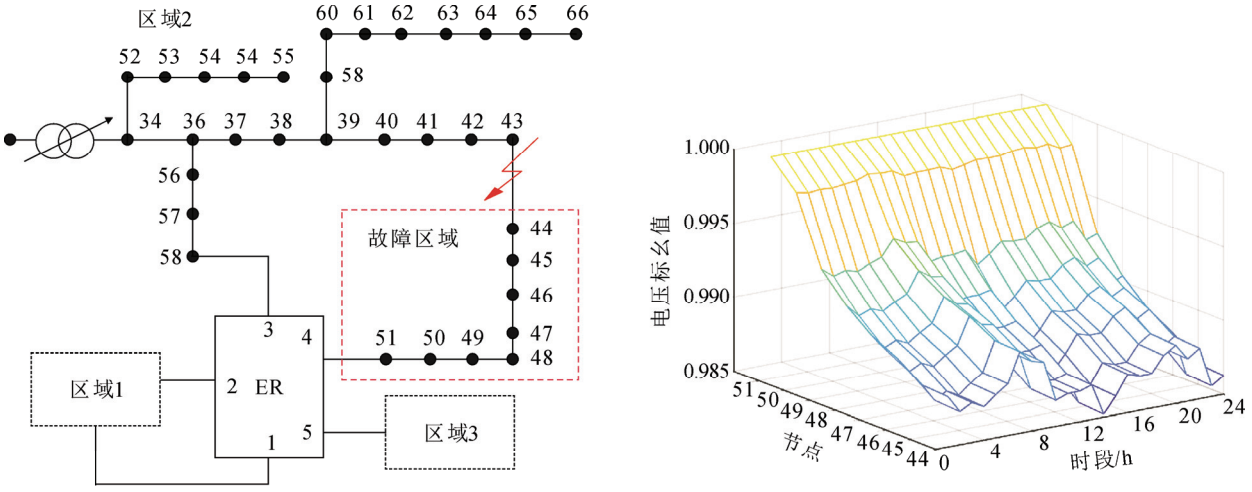
(a) ER各端口有功功率　　(a) SVG及ER各端口无功功率

图 C2　ER 和 SVG 的有功–无功实时调度

Fig.C2　Active-reactive real-time scheduling of ER and SVG

附录 D

以 ER 为代表的灵活配电装备的运用，能在一定程度上增加电网的抗扰能力。如附录 D 图 D1 所示，假设区域 2 节点 43 和 44 之间的线路发生故障，在场景 2 和场景 3 中，由于没有 ER 的互联，区域 2 配网处于开环运行状态，线路需要停电检修，导致节点 44 到节点 51 发生停电，供电可靠性无法得到保障；而在场景 1 中，ER 可以灵活控制端口功率，对系统进行电压优化和网络重构，发挥闭环运行的优势，通过 ER 进行网络重构，为故障区域供电，实现功率的无缝转供。转供后故障区域的节点电压如附图 5 所示，可以看出，由于 ER 端口具有灵活的功率和电压控制能力，网络重构和协调优化后，故障区域的电压在期望范围内。



(a) 区域2故障示意图　　(b) 转供后故障区域电压

图 D1　故障区域示例及电压分析

Fig.D1　Examples of fault areas and voltage analysis

附录 E

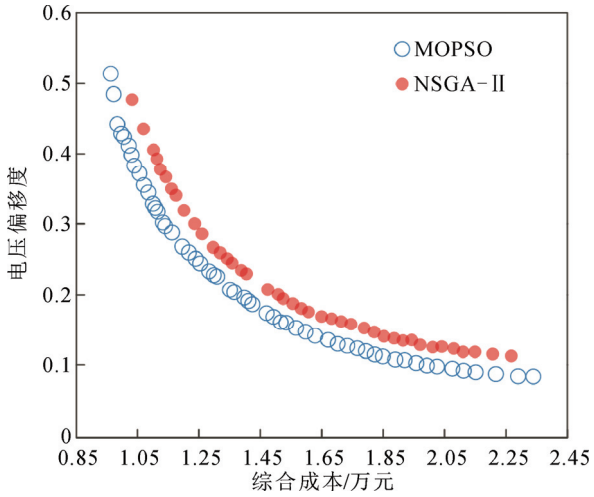


图 E1　改进 MOPSO 和 NSGA-Ⅱ的 Pareto 前沿

Fig.E1　Resulted Pareto front using improved MOPSO and NSGA-II

表 E1　算法求解时间

Table E1　Algorithm solution time

场景	改进 MOPSO		NSGA-II	
	求解时间(日前)/s	求解时间(日内)/s	求解时间(日前)/s	求解时间(日内)/s
1	45.3	30.1	43.7	29.3
2	36.5	23.7	35.8	23.2