

基于电能路由器的配电网稳定运行与故障恢复分层能量优化

杜云飞¹, 尹项根¹, 赖锦木², 王 楨¹, 胡家玄¹, 于 吉¹

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为了解决目前基于电能路由器(EER)的配电网能量优化普遍缺乏对故障恢复的研究及能量路由损耗过大的问题,同时考虑稳定运行与故障恢复2种工况,提出了一种基于EER的配电网分层能量优化策略,其包括下层局域网(E-LAN)内的能量优化以及上层广域网(E-WAN)内的能量路由优化。对于稳定运行工况,提出了以最小化运行总成本为目标的E-LAN能量优化策略,以及以最小损耗就地消纳的E-WAN路由优化策略,路由优化策略在保障可再生能源就地消纳的同时,实现电能损耗最小化。对于故障恢复工况,提出了以最大化累计上网电量为目标的E-LAN能量优化策略,以及最小损耗多源协同的E-WAN路由优化策略,路由优化策略可在向关键负荷优先供电的同时,实现电能损耗最小化,并提升故障后负荷存活率。最后基于配电网分层网络模型进行仿真分析与对比,验证了所提能量优化策略的可行性、有效性和优越性。

关键词:电能路由器;稳定运行;故障恢复;分层配电网;能量优化;路由优化;关键负荷

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202201020

0 引言

随着风机、光伏等分布式电源 DG (Distributed Generation) 的大量接入,传统的配电网能源结构发生了巨大变化,其已经由纯粹的单源辐射网络转变为多源辐射网络。DG 的接入虽然可以提供清洁高效的电能,并扩大了配电网的供电容量,但其出力的间断性、随机性以及负荷的差异性、时变性给配电网的能量控制带来了更为严峻的挑战^[1-2]。此外,随着电力市场改革的不断推进,含有 DG 的用户都应拥有参与点对点电能交易的权利,但是目前的配电网难以实现能量的定向流动和对功率流的主动调控。

电能路由器 EER (Electric Energy Router) 是电力电子技术和通信技术高度融合的产物,是未来配电网最核心的关键设备。EER 不仅能为 DG 提供即插即用的交、直流接口,还可以根据负荷及故障需求自主实现与配电网的隔离或并网,充分保证了配电网的能量平衡;同时,EER 可以通过信息流与能量流的相互制约,实现能量的高效传输与精准路由^[3]。为了克服传统的集中式调度难以处理多元辐射配电网中的能量双向流动问题,同时降低调度中心的计算量和通信量,目前多采用分层架构体系来实现基于 EER 的配电网能量优化,通过“分解-协调”的原则将复杂化、大型化的配电网能量管理问题进行分解简化;文献[4-5]提出了一种未来可再生电力能

源传输和管理 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) 系统结构,通过 EER 将不同电压等级和容量等级的配电母线进行连接,并集中协调管理所有 EER;文献[6]深入分析了基于 EER 的主动配电网分布式分层智能调控,通过“分布自治,分层优化”的运行模式管理主动配电网。这类研究的重点为基于 EER 的配电网分层架构体系与管理模式,不涉及优化控制问题。

目前也有许多文献对配电网的分层控制进行了研究:文献[7]提出一种基于分析目标级联理论的主动配电网分层优化模型,通过对上层配电网和下层的小型微电网进行解耦,使得二者能够自主利用各自的不同资源优化运行,实现综合经济效益的最大化;在此研究的基础上,文献[8]将电网络推广到多能互补网络,通过对配电网与多能微网的协调并行求解,最大限度地提升多主体利益,降低耦合系统运行成本;文献[9]将配电网解耦为多个小型微电网,并将优化控制问题建模为分散的部分可观测的马尔科夫决策过程,并使用协调动态规划算法进行求解;文献[10]提出了基于交替方向乘子法的分布式配电网能量管理架构,用于决策微电网与上层配电网之间的能量交换。

上述传统配电网分层控制模型同样可以应用在基于 EER 的配电网中,不同的是,传统配电网内的最优潮流控制难以区分具体的源和方向,没有考虑配电网配置 EER 后不同微电网间电能传输路径的优化选择问题。与最优潮流不同,EER 间的电能传输被认为与信息互联网中的数据传输一样,可以

收稿日期:2021-03-29;修回日期:2021-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089)

通过路由策略实现定向流动及主动控制^[11-13]。文献[11]提出了一种基于EER的能源互联网分层分区优化策略,着重研究了上层不同EER间的路由优化问题,以最小化电能损耗为优化目标,设计了基于Dijkstra最短路径算法的路由优化策略。但该策略仅能实现单端电源向单端负荷供电,线路利用率不高。文献[12-13]也提出了一种在重负荷场景下,当单一电源无法满足负荷需求时,多端电源向负荷供电的路由优化策略。该策略有效提高了线路利用率,但由于只有当单个电源出力达到上限时才会启用其他电源,因此不同线路间传输的功率并不均衡。输电线路损耗与线路传输的功率呈平方关系^[14-15],不同线路间传输功率的不均衡将会带来更大的能量损耗。

上述研究都仅针对配电网稳定运行工况提出了优化方案,随着用户对电能供应质量和安全可靠性的逐渐提高,如何在主网发生故障、配电网转为孤网运行后,继续保持电网的可靠、经济运行仍然是一个棘手的问题。传统配电网故障恢复研究的核心思想是制定故障发生后的开关状态集,从而通过改变系统网络拓扑重新规划供电路径^[16]。而对于基于EER的配电网而言,不仅无需通过复杂的优化算法求解开关状态集实施故障恢复方案,还可以利用潮流可控的特点,通过路由策略精准地恢复关键负荷,从而降低故障恢复的难度,同时尽可能地带动普通负荷恢复供电,减少失电负荷量,但目前还缺乏相关研究。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于EER的配电网稳定运行与故障恢复分层能量优化策略,主要可分为2层:由EER控制的下层实现局域电网E-LAN(Energy Local Area Network)内的能量优化;由调度中心控制的上层实现广域电网E-WAN(Energy Wide Area Network)内EER间的能量路由优化。对于稳定运行工况,本文提出了以最小化运行总成本为目标的E-LAN能量优化策略,并利用MATLAB/Yalmip调用IBM ILOG CPLEX软件求解优化模型,以提高求解速度;同时提出了最小损耗就地消纳的E-WAN路由优化策略,在保障可再生能源就地消纳的同时,利用多路径输电实现电能损耗最小化。对于故障恢复工况,本文提出了以最大化累计上网电量为目标的E-LAN能量优化策略;同时提出了最小损耗多源协同的E-WAN路由优化策略,在保障关键负荷优先恢复供电的同时,利用多电源供电实现电能损耗最小化,并最大限度地提升故障后孤网内的负荷存活率。

1 配电网分层能量优化策略整体架构

本文所设计的基于EER的多源辐射配电网分层网络模型如图1所示(图中EER_i采用1表示,其

他类似),其包含调度中心控制的由多个EER所组成的E-WAN,以及每个EER所管理的E-LAN。按照E-LAN内是否含有负荷和DG将EER分为以下3类:消费型EER,其管理的E-LAN内全部为负荷,无法实现电能上网,可以从电网中购买电能,满足E-LAN内用户的电能需求;产消型EER,其管理的E-LAN内同时含有负荷和DG,当DG出力大于负荷需求时,可以将剩余电能上网,反之又能从电网中购买电能;关键负荷EER,其接入的负荷为关键负荷,故障恢复工况下需要优先供电以保证其用电连续性。由于在传统单源辐射状配电网中,电压由首端到末端是逐渐降低的,而将DG接入后可以发出有功和无功功率,起到一定的电压支撑作用,所以本文将产消型EER配置在线路末端和长线路中间,以减少配电网线路压降,提高电能质量。EER一方面负责对接入的负荷、DG进行能量优化,保障所管理的E-LAN内电能实时的供需平衡;另一方面与调度中心进行信息交互,按照不同的优化目标完成E-WAN中的能量路由。

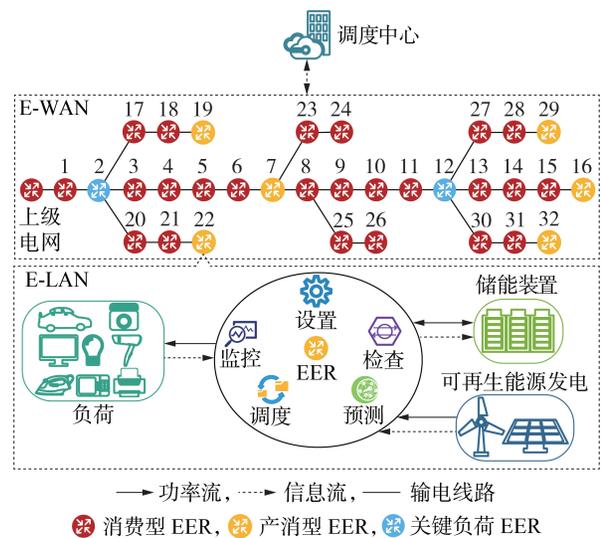


图1 基于EER的配电网分层网络模型

Fig.1 Hierarchical model of distribution network based on EER

需要注意的是,本文所提EER并不限于基于固态变压器SST(Solid State Transformer)的区域型EER,还包括基于多端口变换器MPC(Multi-Port Converter)以及基于电力线通信PLC(Power Line Communication)等的广义EER^[17],由于产消型EER需要对所接负荷、DG和储能进行实时调控,实现能量双向流动与功率灵活控制,故需要配置基于SST的EER。但不包含DG和储能的消费型EER无需进行复杂的双向能量调控,从经济性与实用性角度出发,可以灵活配置其他广义EER。考虑多源辐射配电网结构复杂,功率可以双向流动,不同层次、不同区域的收益目标也不同,本文设计了基于EER的配

电网稳定运行与故障恢复分层能量优化策略,整体架构如图2所示。

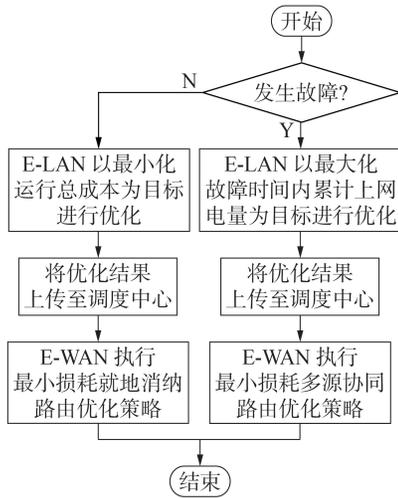


图2 配电网分层能量优化策略整体架构

Fig.2 Overall architecture of hierarchical energy optimization strategy of distribution network

2 下层 E-LAN 内的能量优化策略

在稳定运行时,消费型EER和关键负荷EER并没有DG接入,因此需要根据E-LAN内的负荷需求从电网购电。产消型EER以最小化接入用户在一天内的运行总成本为目标,通过协调不同时间段的DG出力、储能、从电网购售电的行为来实现最大的利益诉求。而在故障恢复时,关键负荷EER的负荷需求应优先满足,产消型EER以最大化故障时间内累计上网电量为目标,在满足关键负荷需求的同时,尽可能提高其他负荷的存活能力,从而提高整个配电网的供电恢复率。

2.1 稳定运行时 E-LAN 的目标函数

光伏和风电是配电网中最常接入的2种DG,为了平抑其出力的间断性和随机性,一般同时接入储能装置进行功率调节。将E-LAN内随机变量,即可再生能源发电量及用户负荷需求视为已知量,将储能的输入、输出和储存电量,以及E-LAN的上网电量和购电电量作为控制变量,由此得到E-LAN在调度周期内的目标函数如式(1)所示。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(n_{pv} C_{pv} P_{pv,t} + n_w C_w P_{w,t} + C_{bat} |P_{bat,t}| - C_{PPP,t} P_{PPP,t} + C_{RPP,t} P_{RPP,t} \right) \quad (1)$$

式中: F 为E-LAN在调度周期内的运行总成本; t 为运行时段; T 为总的调度周期; n_{pv} 、 n_w 分别为E-LAN内所包含的光伏模块数和风电机组数; C_{pv} 、 C_w 分别为光伏和风电机组的平准化度电成本LCOE(Levelized Cost Of Energy)^[18]; C_{bat} 为储能装置的运维成本; $P_{pv,t}$ 、 $P_{w,t}$ 和 $P_{bat,t}$ 分别为光伏、风电机组和储能装置在 t 时

段的出力; $C_{PPP,t}$ 、 $P_{PPP,t}$ 和 $C_{RPP,t}$ 、 $P_{RPP,t}$ 分别为 t 时段的上网电价PPP(Pool Purchase Price)、E-LAN的上网电量和销售电价RPP(Retail Power Price)、E-LAN的购电电量。下面给出求解 $P_{pv,t}$ 、 $P_{w,t}$ 和 $P_{bat,t}$ 的光伏模块、风电机组和储能装置的数学模型。

2.2 DG与储能装置数学模型

1) 光伏模块数学模型。

单个光伏模块在 t 时段的出力 $P_{pv,t}$ 与温度、光照强度等因素有关,如式(2)所示^[19]。

$$P_{pv,t} = P_{std} \frac{G_t}{G_{std}} [1 + k(T_t - T_{std})] \quad (2)$$

$$T_t = T_{amb,t} + \frac{30G_t}{1000} \quad (3)$$

式中: P_{std} 、 G_{std} 、 T_{std} 分别为标准测试条件下的最大输出功率、光照强度和温度; G_t 、 T_t 、 $T_{amb,t}$ 分别为 t 时段的环境光照强度、模块温度和环境温度; k 为温度系数。取 $P_{std}=5\text{ kW}$ 、 G_{std} 、 T_{std} 一般分别取为 1 kW/m^2 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 风电机组数学模型。

风电机组在 t 时段的出力 $P_{w,t}$ 与风速呈正相关,当风速大于等于风机切出风速 v_{out} 时需要切机,小于等于风机切入风速 v_{in} 时风机不能正常工作,则有^[19]:

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0 & v_t \leq v_{in} \text{ 或 } v_t \geq v_{out} \\ P_{rate} \left(\frac{v_t - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}} \right)^3 & v_{in} < v_t < v_{rate} \\ P_{rate} & v_{rate} \leq v_t < v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_t 为 t 时段的环境风速; v_{rate} 为额定风速; P_{rate} 为风电机组的额定输出功率。取 $v_{rate}=15\text{ m/s}$ 、 $P_{rate}=3.5\text{ kW}$ 。

3) 储能装置数学模型。

对储能装置的能量优化主要是由其荷电状态SOC(State Of Charge)值决定的,储能装置在 t 时段的SOC值 V_t^{SOC} 的计算公式为:

$$V_t^{SOC} = \frac{E_t}{E_{total}} \times 100\% = \begin{cases} V_{t-1}^{SOC} (1-\theta) - \eta_{cha} P_{bat,t-1} & P_{bat,t-1} \leq 0 \\ V_{t-1}^{SOC} (1-\theta) - P_{bat,t-1} / \eta_{dis} & P_{bat,t-1} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_t 、 E_{total} 分别为 t 时段的储能实际荷电量和额定容量; θ 、 η_{cha} 、 η_{dis} 分别为储能自放电率、充电效率和放电效率。

2.3 约束条件

1) E-LAN内的功率平衡约束。

$$n_{pv} P_{pv,t} + n_w P_{w,t} + P_{bat,t} + P_{RPP,t} = P_{PPP,t} + P_{load,t} \quad (6)$$

式中: $P_{load,t}$ 为 t 时段的负荷。

2) E-LAN与E-WAN的交换功率约束。

$$\delta_{PPP,t} + \delta_{RPP,t} = 1 \quad (7)$$

$$P_{RPP,t} + P_{PPP,t} \leq P_{net_max} \quad (8)$$

式中: $\delta_{PPP,t}$ 和 $\delta_{RPP,t}$ 为0-1分量, $\delta_{PPP,t}$ 和 $\delta_{RPP,t}$ 取值为1、0

分别表示 E-LAN 电量是、否上网和 E-LAN 是、否购电; $P_{\text{net,max}}$ 为 E-LAN 与 E-WAN 的最大交换功率。

3) 储能装置约束。

$$\delta_{\text{cha},t} + \delta_{\text{dis},t} = 1 \quad (9)$$

$$\left| P_{\text{bat},t} \right| \leq \begin{cases} P_{\text{cha,max}} & \delta_{\text{cha},t} = 1 \\ P_{\text{dis,max}} & \delta_{\text{dis},t} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$V_{\text{min}}^{\text{SOC}} \leq V_t^{\text{SOC}} \leq V_{\text{max}}^{\text{SOC}} \quad (11)$$

式中: $\delta_{\text{cha},t}$ 和 $\delta_{\text{dis},t}$ 为 0-1 分量, $\delta_{\text{cha},t}$ 和 $\delta_{\text{dis},t}$ 取值为 1、0 分别表示储能装置是、否充电和放电; $P_{\text{cha,max}}$ 和 $P_{\text{dis,max}}$ 分别为储能装置的最大充电功率和最大放电功率; $V_{\text{min}}^{\text{SOC}}$ 和 $V_{\text{max}}^{\text{SOC}}$ 分别为允许的最小、最大 SOC 值, 通过约束 SOC 值可以提高储能装置使用寿命、节约维护成本。

2.4 E-LAN 故障恢复时的目标函数

当主网突发故障时, 配电网与主网连接点断开, 会造成其下游所有线路与主网失去连接, 形成孤网, 孤网内只能由产消型 EER 接入的 DG 与储能装置实现供电, 所以此时应尽可能提高其累计上网电量, 保障关键负荷在故障期间不会失电的同时, 尽可能地恢复更多的负荷。在不改变原有目标函数的基础上, 等效实现故障时间内累计上网电量的最大化, 引入售电激励(购电惩罚)系数 $M (M \rightarrow +\infty)$, 将式(1)中的 $C_{\text{PPP},t}$ 与 $C_{\text{RPP},t}$ 置为 M , 此时的目标函数如式(12)所示。

$$\min F_{\text{fault}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{fault}}} \left(n_{\text{pv}} C_{\text{pv}} P_{\text{pv},t} + n_{\text{w}} C_{\text{w}} P_{\text{w},t} + C_{\text{bat}} \left| P_{\text{bat},t} \right| - MP_{\text{PPP},t} + MP_{\text{RPP},t} \right) \quad (12)$$

式中: F_{fault} 为 E-LAN 内用户在故障期间的运行总成本; t 为故障运行时段; T_{fault} 为故障持续时间。可以根据 $P_{\text{load},t}$ 与 t 时段的 DG 出力 $P_{\text{DG},t}$ 在故障期间不同时段的大小关系将 E-LAN 分为 3 类: ①在故障期间的每个时段内均有 $P_{\text{load},t} < P_{\text{DG},t}$ 的 E-LAN, 其会在 M 值的激励作用下积极上网所有电能, 而不会储存在储能装置中引起 F_{fault} 增加; ②在故障期间的每个时段内均有 $P_{\text{load},t} > P_{\text{DG},t}$ 的 E-LAN, 其会在 M 值的惩罚作用下优先使用储能装置中的电能, 以保证 F_{fault} 减小; ③在故障期间部分时段有 $P_{\text{load},t} < P_{\text{DG},t}$, 部分时段有 $P_{\text{load},t} > P_{\text{DG},t}$ 的 E-LAN, 其也不会 $P_{\text{load},t} < P_{\text{DG},t}$ 的时段储存电能以待使用, 因为储能装置的充放电会带来运维成本使得 F_{fault} 增加, 而此时的孤网中 $C_{\text{PPP},t} = C_{\text{RPP},t}$, 不同时段购、售相同的电量不会带来额外成本。综上可知, 故障期间 E-LAN 无论在何种情况下, 都可以实现累计上网电量最大化, 满足预期目标。需要说明的是, M 值仅是虚拟电价, 故障期间孤网内实际的 $C_{\text{PPP},t}$ 和 $C_{\text{RPP},t}$ 应与主网相一致。目前认为 E-LAN 内的能量优化属于混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming)^[20] 问题, 可采用 MATLAB / Yalmip 调用 IBM ILOG CPLEX 软件提高求解速度。

3 上层 E-WAN 内的路由优化策略

3.1 稳定运行时 E-WAN 的路由优化策略

EER 在完成下层 E-LAN 能量优化后, 便会依据自身优化结果确定每个时段与 E-WAN 间的售、购电量。E-WAN 内能量路由的决策者为电力公司的调度中心, 在获取社会效益的同时, 也必须承担社会义务, 积极响应国家促进可再生能源就地消纳的号召^[21]; 且为了避免电能传输阻塞, 减少长距离传输电能引起的损耗、降低调度中心计算量, 也需要促进电能的就地消纳。同时由于 t 时段内的 $C_{\text{PPP},t}$ 与 $C_{\text{RPP},t}$ 是定值, 为实现利益最大化, 就需要保证 E-WAN 内电能路由总损耗最小。基于此, 本文设计了 E-WAN 稳定运行期间, t 时段内的最小损耗就地消纳路由优化策略, 其整体架构如图 3 所示, 流程图见附录 A 图 A1, 具体步骤如下。

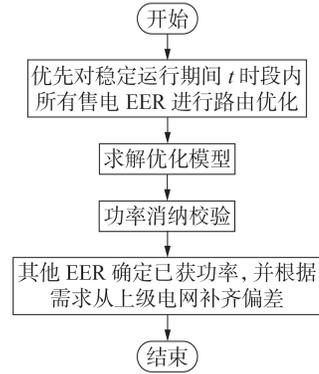


图3 稳定运行的 t 时段内, E-WAN 路由优化策略整体架构

Fig.3 Overall architecture of routing optimization strategy of E-WAN in stable operation period t

1) 遍历获得稳定运行期间 t 时段内向电网售电的所有产消型 EER, 优先对其进行路由优化。以 EER_s 为例, 设 t 时段上网功率为 $P_{s,\text{PPP},t}$, 由前文可知输电线路损耗与线路传输功率增量呈平方关系, 综合利用多条线路传输电能可以减小损耗。通过查询 EER_s 路由表可得距其跳数 h 的 EER 集合 $\Omega_h^{\text{EER}} = \{ \text{EER}_h^1, \text{EER}_h^2, \dots, \text{EER}_h^i, \dots, \text{EER}_h^n \} = (\text{EER}_h^i)_{1 \times n}$, 不同的 h 对应的 EER 数 n 也不同, 显然 $\Omega_0^{\text{EER}} = \{ \text{EER}_s \}$ 。 Ω_h^{EER} 更新消纳电能示意图如图 4 所示。为实现就地消纳, 首先令 $h=1$, 由 EER_s 向集合 Ω_h^{EER} 分配 $P_{s,\text{PPP},t}$, 目标函数为:

$$\min \sum_{h=1,2,\dots} \sum_{i=1}^n P_{h,\text{loss}}^i (P_h^i) \quad (13)$$

$$P_{h,\text{loss}}^i = \sum_{h=1,2,\dots} \left\{ \frac{R_{(h-1,h)}^i}{(U_{(h-1,h)}^i)^2} [(P_h^i + P_{(h-1,h)}^i)^2 - (P_{(h-1,h)}^i)^2] + (1 - \eta_{\text{hin}}^i \eta_{\text{hout}}^i) P_h^i \right\} \quad (14)$$

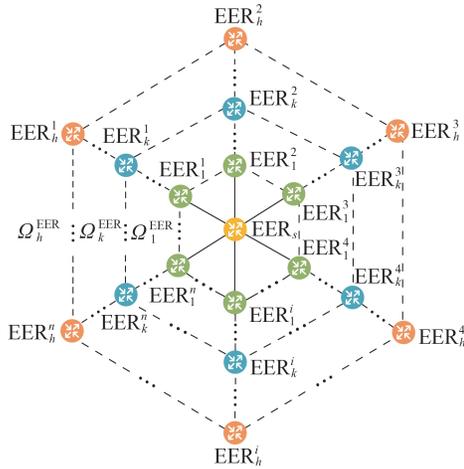


图4 集合 Ω_h^{EER} 更新消纳电能示意图
Fig.4 Schematic diagram of energy absorbed by set Ω_h^{EER} renewal

式中: P_h^i 为 EER_s 向 EER_h^i 分配的功率,为满足配电网运行准则,除非 EER_s 位于线路末端,否则 P_h^i 必须与上级电网调配功率的传输方向一致; $P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i)$ 为传输 P_h^i 所引起的路径上的功率损耗; $U_{(h-1,h)}^i$ 为 EER_{h-1}^i 与 EER_h^i 间线路的电压等级; $R_{(h-1,h)}^i$ 为线路电阻阻值; $P_{(h-1,h)}^i$ 为当前传输功率; η_{hin}^i 、 η_{hout}^i 分别为 EER_h^i 电能输入、输出效率。

应满足的约束条件如下。

(1) EER_s 的功率平衡约束为:

$$\sum_{h=1,2,\dots,n} \sum_{i=1}^n P_h^i - P_{s,\text{pppt}} = 0 \quad (15)$$

(2)功率传输方向约束为:

$$P_h^i - P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i) \geq 0 \quad (16)$$

(3)线路功率容量约束为:

$$\sum_{h=1}^h P_h^i + P_{(k-1,k)}^i \leq P_{(k-1,k)}^{\text{max}} \quad (17)$$

式中: $P_{(k-1,k)}^i$ 和 $P_{(k-1,k)}^{\text{max}}$ 分别为 EER_{k-1}^i 与 EER_k^i 间线路当前已传输功率和传输容量。假设 EER_{k-1}^i 下一跳为 EER_k^i ,则 i 实质上表示了功率的传输方向。

2)求解优化模型。由式(13)—(17)构造的拉格朗日函数最小值条件为:

$$\frac{\partial P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i)}{\partial P_h^i} + \mu_1 + \mu_2 \left(1 - \frac{\partial P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i)}{\partial P_h^i} \right) - \sum_{k=1}^h \mu_{3,k} = 0 \quad (18)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式中: μ_1 、 μ_2 、 $\mu_{3,k}$ 为拉格朗日乘子。由于式(16)、(17)为不等式方程,因此求解问题还需要以下互补松弛条件:

$$\begin{cases} \mu_2 (P_h^i - P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i)) = 0 \\ \mu_{3,k} \left(P_{(k-1,k)}^{\text{max}} - \sum_{h=1}^h P_h^i - P_{(k-1,k)}^i \right) = 0 \\ \mu_2 \geq 0, \mu_{3,k} \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式(15)—(19)即为此时路由优化策略的KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件。式(19)表明不等式约束要么受限要么不受限,如果受限则为紧约束,可转化为等式约束条件,相应的拉格朗日乘子 μ 为正数,此时求解为线性规划问题,显然式(14)为凸函数,该规划为凸规划,最优解如果存在就是唯一的;若不受限,则不等式约束对优化策略无影响, $\mu=0$ 。

3)由式(15)—(19)得到最优解后,按照式(20)对集合 Ω_h^{EER} 进行功率消纳校验。

$$P_h^i - P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i) \leq P_{h,\text{load}}^i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中: $P_{h,\text{load}}^i$ 为当前优化时段内 EER_h^i 的功率需求。之所以没有将式(20)列入KKT条件中,有如下两方面原因:一是避免所有不等式约束都转化为紧约束后出现的无解情况,即 $h=1$ 难以消纳所有功率;二是避免式(20)转为紧约束后造成的功率损耗激增。一种对于式(20)所示约束更合理的处理方法是:若存在不满足式(20)的情况,则令 $h=h+1$,通过查询 EER_s 路由表,得到更新后的集合 Ω_h^{EER} (如图4所示),消纳更多功率的同时避免损耗激增,由式(14)计算 $P_{h,\text{loss}}^i(P_h^i)$,再次求解式(15)—(19),并通过式(20)进行功率消纳校验,若不满足式(20)则令 $h=h+1$ 并更新集合 Ω_h^{EER} ,继续对下一跳的EER分配功率,通过逐次求解直至满足式(20),从而实现 EER_s 的路由优化。

4)对于其他EER而言,先由产消型EER的路由优化策略确定自身已获得功率,并根据负荷需求从上级电网调配功率补齐偏差。由于上级电网与其只存在单条路径,此时不需要进行路由优化。需要说明的是,如果由于线路功率约束导致EER的上网电量/购电量受限,则会将受限值作为新约束加入约束条件中并再次求解E-LAN内的能量优化,必要时需要切机/切负荷以保持功率平衡。

以图1所示的E-WAN内 EER_7 为例对稳定运行时的最小损耗就地消纳路由优化策略进行说明。E-WAN稳定运行时的路由优化策略实例如图5所示。由图可见, EER_7 上网电量为 $P_{7,\text{pppt}}$,查询 EER_7 的路由表可确定距其跳数 $h=1$ 且位于下游的EER集合

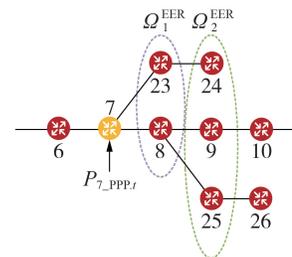


图5 稳定运行时E-WAN的路由优化策略实例
Fig.5 Routing optimization strategy example of E-WAN in stable operation

$\Omega_h^{EER} = \{EER_8, EER_{23}\}$, 依据式(15)–(19)优先向 Ω_h^{EER} 分配 $P_{7_PPP,t}$, 计算 EER_8 、 EER_{23} 所得功率及传输损耗, 代入式(20)进行功率消纳校验, 若不满足式(20), 则令 $h=h+1$, 得到 $\Omega_h^{EER} = \{EER_9, EER_{24}, EER_{25}\}$, 然后再次计算式(15)–(19), 并由式(20)进行功率消纳校验。若此时满足校验, 则实现最优路由策略, 供电集合为 $\{EER_8, EER_9, EER_{23}, EER_{24}, EER_{25}\}$ 。

3.2 E-WAN 故障恢复时的路由优化策略

当上级电网突发故障后, E-WAN 与其断开连接形成孤网, 孤网中的 EER 在完成下层 E-LAN 能量优化之后, 便会在每个时段依据优化结果向孤网中售电或购电。由于现存功率可能无法供应孤网内所有负荷用电, 此时应保障关键负荷优先供电。为了解决现有多端电源路由策略存在的线路功率不均衡造成的损耗较大问题, 实现电能损耗最小化, 同时最大限度地保障故障后孤网内关键负荷的存活, 本文提出了 E-WAN 故障恢复时的最小损耗多源协同路由优化策略整体架构如图 6 所示, 详细流程图见附录 A 图 A2, 具体说明如下。

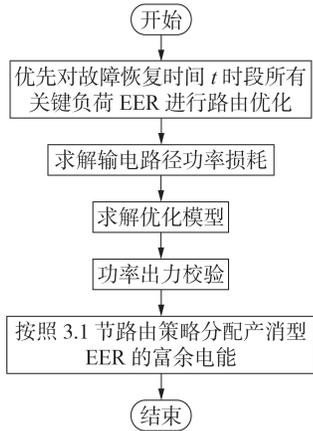


图 6 故障恢复期间, t 时段内的 E-WAN 路由优化策略整体架构

Fig.6 Overall architecture of routing optimization strategy of E-WAN in fault recovery period t

1) 遍历获得故障恢复期间 t 时段内的关键负荷 EER, 优先进行路由优化。以关键负荷 EER_d 为例, 设 t 时段负荷需求为 $P_{d_RPP,t}$, 由前文可知输电线路损耗与线路传输功率增量呈平方关系, 利用多端电源协同为 EER_d 供电可有效减小损耗, 查询 EER_d 的路由表可得距其路由跳数不大于 p 的产消型 EER 集合为 $\Omega_p^{EER} = \{EER_p^1, EER_p^2, \dots, EER_p^i, \dots, EER_p^m\} = (EER_p^i)_{1 \times m}$, p 不同则对应的产消型 EER 数 m 不同。集合 Ω_p^{EER} 更新供应电能示意图如图 7 所示。由集合 Ω_p^{EER} 向 EER_d 协同供电, 目标函数为:

$$\min \sum_p \sum_{j=1}^m P_{p,loss}^j(P_p^j) \quad (21)$$

式中: P_p^j 为 EER_p^i 向 EER_d 分配的功率, 此时为孤网运

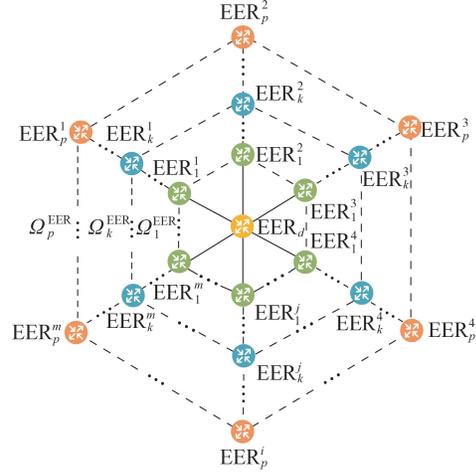


图 7 集合 Ω_p^{EER} 更新供应电能示意图

Fig.7 Schematic diagram of energy supplied by set Ω_p^{EER} renewal

行, P_p^j 无须与上级电网调配功率的传输方向一致; $P_{p,loss}^j(P_p^j)$ 为传输 P_p^j 所引起的路径上的功率损耗。

2) 求解 $P_{p,loss}^j(P_p^j)$ 。现有文献都假定传输路径上的每条线路的首端注入功率近似保持不变^[11], 在式(14)中也采用了该假设。这是由于就地消纳的路由策略跳数较少, 为简化计算首端注入功率可以近似等值处理, 然而多端协同的路由策略跳数较多, 损耗较大, 同条路径内不同线路的注入功率差别很大, 无法再进行等值处理, 因此给出一种更精准的损耗计算方法, 具体说明如下。

路径功率损耗分布示意图如图 8 所示, 设 EER_d 与 EER_p^i 间路径上所有 EER 的集合为 $\Omega_{EER}^j = \{EER_1^j, EER_2^j, \dots, EER_r^j, \dots, EER_q^j\} = (EER_r^j)_{1 \times q}$, 由于 p 为跳数上限, 故 $q < p$ 。

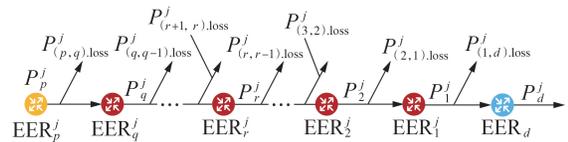


图 8 路径功率损耗分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of path power loss distribution

首先求解 EER_p^i 与 EER_q^j 之间的线路损耗 $P_{(p,q),loss}^j$:

$$P_{(p,q),loss}^j = \frac{R_{(p,q)}^j}{(U_{(p,q)}^j)^2} [(P_p^j + P_{(p,q)}^j)^2 - (P_{(p,q)}^j)^2] \quad (22)$$

则 EER_q^j 的输出功率 P_q^j 为:

$$P_q^j = (P_p^j - P_{(p,q),loss}^j) \eta_{qin}^j \eta_{qout}^j \quad (23)$$

式中: 各参数定义与式(14)中的参数定义类似, 在此不再赘述。

进而求得 EER_q^j 与 EER_{q-1}^j 之间的线路损耗 $P_{(q,q-1),loss}^j$ 和 EER_{q-1}^j 的输出功率, 依此类推, 沿着集合 Ω_{EER}^j 求解最终得到 EER_d 的输出功率 P_d^j , P_d^j 即为用户实际得到的功率, 则路径总损耗 $P_{p,loss}^j(P_p^j)$ 为:

$$P_{p,\text{loss}}^j(P_p^j) = P_p^j - P_d^j \quad (24)$$

与3.1节类似,应满足的约束条件如下。

(1) EER_d的功率平衡约束为:

$$\sum_{j=1}^m P_d^j - P_{d,\text{RPP},d} = 0 \quad (25)$$

(2) 功率传输方向约束为:

$$P_p^j - P_{p,\text{loss}}^j(P_p^j) \geq 0 \quad (26)$$

(3) 线路功率容量约束为:

$$\begin{cases} P_p^j + P_{(p,q)}^j \leq P_{(p,q)}^{\text{max}} \\ P_p^j + P_{(r,r-1)}^j \leq P_{(r,r-1)}^{\text{max}} & r=2,3,\dots,q \\ P_p^j + P_{(r,d)}^j \leq P_{(r,d)}^{\text{max}} & r=1 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{(r,r-1)}^j$ 与 $P_{(r,r-1)}^{\text{max}}$ 分别为EER_r与EER_{r-1}间线路当前传输功率与容量;与3.1节类似, j 实质上表示功率传输方向。为保留一定容量裕度,取线路注入功率为 P_p^j ,而实际功率一定是不大于 P_p^j 的。

3) 求解优化模型。

由式(21)~(27)构造拉格朗日函数最小值条件为:

$$\frac{\partial P_{p,\text{loss}}^j(P_p^j)}{\partial P_p^j} + \lambda_1 + \lambda_2 \left(1 - \frac{\partial P_{p,\text{loss}}^j(P_p^j)}{\partial \Delta P_p^j} \right) - \lambda_3 - \sum_{r=1}^q \lambda_{4,r} = 0 \quad (28)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_{4,r}$ 为拉格朗日乘子。由于式(26)、(27)为不等式方程,因此问题求解还需要以下互补松弛条件:

$$\begin{cases} \lambda_2 (P_p^j - P_{p,\text{loss}}^j(P_p^j)) = 0 \\ \lambda_3 (P_{(p,q)}^{\text{max}} - P_p^j - P_{(p,q)}^j) = 0 \\ \lambda_{4,r} (P_{(r,r-1)}^{\text{max}} - P_p^j - P_{(r,r-1)}^j) = 0 & r=2,3,\dots,q \\ \lambda_{4,r} (P_{(r,d)}^{\text{max}} - P_p^j - P_{(r,d)}^j) = 0 & r=1 \\ \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0, \lambda_{4,r} \geq 0 \end{cases} \quad (29)$$

式(25)~(29)即为E-WAN故障恢复时路由优化策略的KKT条件。式(29)表明不等式约束要么受限要么不受限,如果受限则为紧约束,可转化为等式约束条件,相应的拉格朗日乘子 λ 为正数,此时求解为线性规划问题,式(24)为凸函数,该规划为凸规划,除非所有路径全部发生能量阻塞,否则最优解一定存在且唯一;若不受限,则不等式约束对优化策略无影响, $\lambda=0$ 。

4) 由式(25)~(29)得到最优解后,按照式(30)对集合 Ω_p^{EER} 进行功率出力校验。

$$P_p^j \leq P_{p,\text{PPP},t}^j \quad j=1,2,\dots,m \quad (30)$$

式中: $P_{p,\text{PPP},t}^j$ 为故障恢复期间 t 时段内EER_p的上网电量。与3.1节相同,之所以没有将式(30)列入KKT条件中,一是为了避免所有不等式约束都转化为紧约束后出现的无解情况,即集合 Ω_p^{EER} 难以满足EER_d的关键负荷需求,无法实现完全故障恢复;二是为了避免式(30)转为紧约束后造成的功率损耗激增。相

应的处理方法是:若存在不满足式(30)的情况,则令 $p=p+1$,如图7所示扩充 Ω_p^{EER} 并再次求解优化模型。并通过式(30)进行功率出力校验,以在提供更多功率的同时避免损耗激增,若不满足式(30)则令 $p=p+1$,通过逐次求解直至满足式(30),从而实现EER_d的路由优化。

5) 在所有关键负荷EER都进行路由优化后,若部分产消型EER的上网电量仍有富余,则按照3.1节的最小损耗就地消纳路由优化策略分配剩余功率,从而实现故障恢复期间E-WAN内的最优路由。需要说明的是,若存在总电量不足导致部分EER购电电量受限的情况,则需要切除部分负荷保持功率平衡。

以图1中E-WAN内的EER₂为例对故障恢复时的最小损耗多源协同路由优化策略进行说明,E-WAN故障恢复时的路由优化策略实例如图9所示。假设上级电网与EER₁间线路发生故障,故障期间 t 时段内EER₂购电电量为 $P_{2,\text{RPP},t}$,若跳数限制 $p=3$,则其供电集合 $\Omega_p^{\text{EER}} = \{\text{EER}_{19}, \text{EER}_{22}\}$,依据式(25)~(29)由 Ω_p^{EER} 协同供电,并通过式(30)进行功率出力校验及调整。若此时难以实现EER₂的完全供电恢复,令 $p=p+1$ 后再次求解模型并进行功率出力校验。假设当 $p=5, \Omega_p^{\text{EER}} = \{\text{EER}_7, \text{EER}_{19}, \text{EER}_{22}\}$ 时满足式(30),则由EER₇、EER₁₉、EER₂₂协同供电,实现EER₂的完全故障恢复。

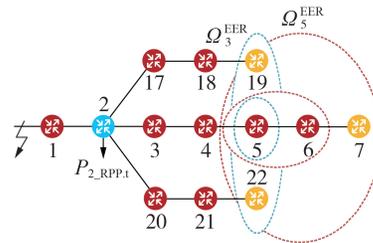


图9 故障恢复期间的E-WAN路由优化策略实例
Fig.9 Routing optimization strategy example of E-WAN in fault recovery

4 仿真与分析

4.1 E-LAN能量优化策略的仿真与分析

参考典型的光伏模块、风电机组与储能装置参数^[19],本文给定的目标函数与约束条件基本参数如附录B表B1所示。某地区一天的内光照强度、温度、风速曲线如附录B图B1所示,日前规定的上网电价与销售电价如附录B图B2所示。产消型EER所管理的E-LAN内的光伏风机数如附录B表B2所示。

以1d为优化周期,对E-LAN稳定运行与故障恢复能量优化策略进行仿真。在故障恢复仿真过程中,假设上级电网与EER₁间线路在12:00发生故障,下级线路全部变成孤网,故障维修时间预计为4h,

在此期间切换为E-LAN故障恢复能量优化策略,故障消除后切换为E-LAN稳定运行能量优化策略。所有产消型EER所管理的E-LAN的能量优化策略仿真结果如附录B图B3所示,其中DG较多的EER₁₆与DG较少的EER₃₂的能量优化仿真结果如图10所示。E-WAN交换功率为正表示 $\delta_{\text{RPP},t}=1$,即E-LAN从E-WAN中购买电能,为负表示 $\delta_{\text{PP},t}=1$,即E-LAN向E-WAN售出电能。

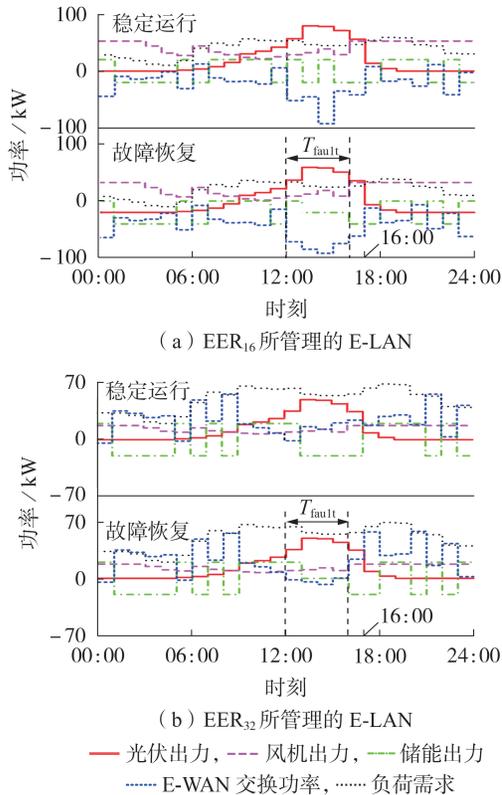


图10 E-LAN能量优化策略的仿真结果

Fig.10 Simulative results of energy optimization strategy of E-LAN

稳定运行时,各E-LAN为实现在1d内的运行总成本最小化,会在销售电价低的时候买入部分电能,或对富余DG出力进行储存。在上网电价高时将富余DG出力和储存的电能卖出,通过电能时移减少成本。通过优化,DG较多的EER₁₆、EER₁₉和EER₂₂所管理的E-LAN在稳定运行时可以保证仅在用电高峰时段(07:00—08:00和21:00—22:00)购入较多电量以平衡负荷需求。表1为各产消型EER仅实现功率平衡和采用稳定运行能量优化策略所产生的成本。由表可见,采用本文所提以最小化运行总成本为目标的E-LAN能量优化策略可以有效减少20%左右的运行成本。

在故障恢复时,要以故障期间内累计上网电量最大化为目标,在12:00—16:00期间储能会在满足自身SOC值约束的条件下尽可能输出电能,不会再

表1 各产消型EER在功率平衡和E-LAN稳定运行能量优化策略下的运行总成本

Table 1 Total operation cost of each prosumer EER under power balance and energy optimization strategy of E-LAN in stable operation

EER	运行总成本/元		成本节约比例/%
	功率平衡	稳定运行	
EER ₇	284.24	233.44	17.9
EER ₁₆	148.52	114.19	23.1
EER ₁₉	178.40	146.10	18.1
EER ₂₂	160.55	131.79	17.9
EER ₂₉	211.45	176.11	16.7
EER ₃₂	208.17	175.03	15.9

为了减小成本而储存电能。表2为稳定运行与故障恢复期间的12:00—16:00时段,各产消型EER在E-LAN能量优化策略下的累计上网电量,通过对比可以发现,采用E-LAN故障恢复能量优化策略后,故障期间累计上网电量会有明显增加,总增量可达58.9%。即使是在E-LAN稳定运行能量优化策略下需要一直购入电能的EER₂₉和EER₃₂,在故障期间也可以实现少量的电能售出。

表2 稳定运行与故障恢复期间的12:00—16:00时段内,各产消型EER在E-LAN能量优化策略下的累计上网电量

Table 2 Accumulated on-grid power of each prosumer EER during 12:00-16:00 in stable operation and fault recovery under energy optimization strategy of E-LAN

EER	累计上网电量/(kW·h)		增加电量/(kW·h)
	稳定运行	故障恢复	
EER ₇	132.37	172.37	40.00
EER ₁₆	8.76	68.78	60.02
EER ₁₉	84.13	117.09	32.96
EER ₂₂	337.87	357.87	20.00
EER ₂₉	-48.42	12.35	60.77
EER ₃₂	-48.39	12.37	60.76

综上所述,通过E-LAN能量优化策略,可以在稳定运行时实现最小化运行总成本,保障用户利益诉求;在故障期间实现最大化累计上网电量,保障配电网内的负荷需求,提高存活率。

4.2 E-WAN路由优化策略仿真分析

图1中E-WAN是修改后的IEEE 33节点标准配电系统^[22],各线路电阻阻值和各EER端口效率分别如附录B表B3和表B4所示。以1d为周期,分别对E-WAN稳定运行与故障恢复能量路由优化策略进行仿真,依据E-WAN交换电能情况完成上层E-WAN的路由优化策略,所有产消型EER的能量路由优化策略的仿真结果如附录B图B4所示,以EER₇与EER₁₆的仿真结果为例进行分析,对应的仿真结果如图11所示,图中时段1、2、…、24分别对应00:00—01:00、02:00—03:00、…、23:00—24:00。

1) E-WAN稳定运行路由优化策略仿真分析。

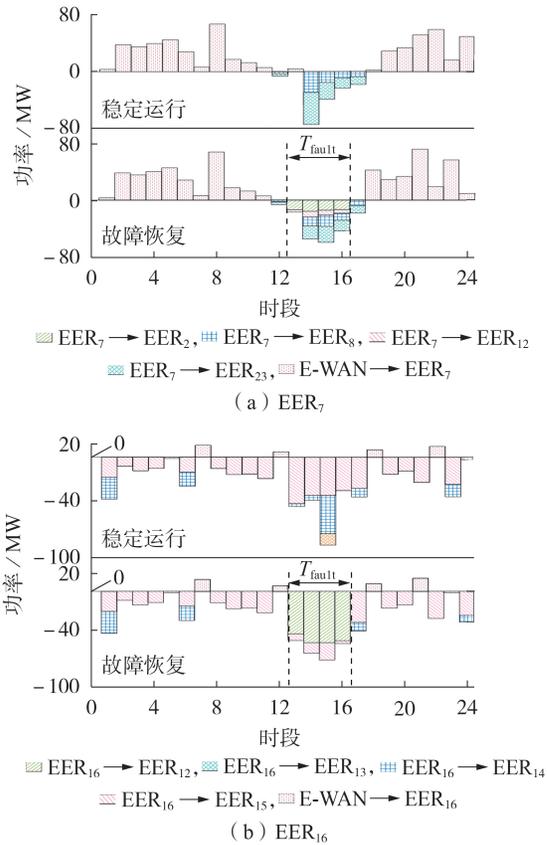


图11 调度中心所管理的E-WAN在一天内的路由优化仿真结果

Fig.11 Simulative results of routing optimization in E-WAN managed by power dispatching center within one day

在E-WAN稳定运行时执行最小损耗就地消纳路由优化策略。选取13:00—14:00时段EER₇的路由优化进行分析。EER₇的上网电量为74.12 kW·h,为实现就地消纳,查询EER₇的路由表确定距其跳数 $h=1$ 且位于下游的EER集合 $\Omega_1^{\text{EER}}=\{\text{EER}_8, \text{EER}_{23}\}$,依据式(15)—(19)向 Ω_1^{EER} 分配电能,计算可得向EER₈、EER₂₃输送的电能分别为30.18、43.94 kW·h,且能够满足电能消纳校验,EER₇路由优化完成。

上述情况无需更新集合 Ω_h^{EER} ,下面选取14:00—15:00时段EER₁₆的路由优化,对 $h=1$ 时不满足电能消纳校验的情况进行分析。EER₁₆的上网电量为92.16 kW·h,需要优先向跳数 $h=1$ 的 $\Omega_1^{\text{EER}}=\{\text{EER}_{15}\}$ 输送电能,由于不满足功率消纳校验,需要令 $h=h+1$ 后再次计算式(15)—(19)并进行功率消纳校验,最终 $h=3$ 时满足功率消纳校验, $\Omega_3^{\text{EER}}=\{\text{EER}_{15}, \text{EER}_{14}, \text{EER}_{13}\}$,向EER₁₅、EER₁₄、EER₁₃输送的电能分别为40.24、40.38、11.54 kW·h,其中EER₁₅、EER₁₄由EER₁₆独立供电,EER₁₃由EER₁₆与上级电网协同供电。

2) E-WAN故障恢复路由优化策略仿真分析。

在E-WAN故障恢复时执行最小损耗多源协同路由优化策略,优先为EER₂和EER₁₂恢复供电。若 p

取值过小不仅难以实现关键负荷完全恢复,还会导致损耗增加,而 p 取值过大又会出现交叉供电问题,依据拓扑结构取 p 的初值为3,上限为5。

选取12:00—13:00时段关键负荷EER₂的路由优化进行分析,其负荷需求为43.36 kW·h,初始供电集合 $\Omega_p^{\text{EER}}=\{\text{EER}_{19}, \text{EER}_{22}\}$,依据式(25)—(29)由 Ω_p^{EER} 协同供电,并根据式(30)进行功率出力校验及调整。此时难以实现EER₂的完全恢复供电,故令 $p=p+1$,再次求解模型并进行校验,最终在 $p=5$ 时满足功率出力校验,供电集合 $\Omega_5^{\text{EER}}=\{\text{EER}_7, \text{EER}_{19}, \text{EER}_{22}\}$,计算可得由EER₇、EER₁₉、EER₂₂输送的电能分别为13.33、10.46、27.15 kW·h。在满足EER₂的需求后,剩余电能再依据稳定运行时的E-WAN路由优化策略进行分配。

4.3 E-WAN路由优化策略的对比分析

1) 稳定运行时E-WAN路由优化策略的对比分析。

为进一步论证所提稳定运行工况下的最小损耗就地消纳E-WAN路由优化策略优越性,同样以损耗就地消纳为前提,仍然选取13:00—14:00时段EER₇的路由优化进行分析,采用文献[11]中基于Dijkstra算法的路由优化策略进行对比,得到的仿真结果如表3所示。

表3 稳定运行时,不同路由优化策略的对比分析

Table 3 Comparative analysis of different routing optimization strategies in stable operation

路由优化策略	受电 EER	传输电能 / (kW·h)	电能损耗 / (kW·h)	电能总损耗 / (kW·h)
本文策略	EER ₈	30.18	1.36	2.95
	EER ₂₃	43.94	1.59	
文献[11]的策略	EER ₂₃	74.12	3.86	3.86

这2种策略的技术差异性在于:本文所提最小损耗就地消纳路由优化策略可以同时多个备选路径上传输电能,同时利用KKT条件求得满足约束的最小电能损耗传输方案;而文献[11]中基于Dijkstra算法的路由优化策略仅能选择满足约束的单条最优路径传输电能,不仅线路利用率不高,还会造成更高的损耗。EER₇与EER₂₃间路径同EER₇与EER₈间的路径相比,在传输相同电能的前提下会造成更小的损耗,如表3所示,所以文献[11]所提的路由策略选择前者作为最优路径来传输电能。所得电能总损耗为3.86 kW·h,要大于本文策略下的2.95 kW·h,总损耗增加了30.8%。

综上所述,本文所提最小损耗就地消纳路由优化策略的优越性在于摒弃了以往路由优化策略单端电源向单端负荷供电的思想,综合考虑了单端电源通过多条路径向多端负荷的电能传输。通过合理优

化分配各条路径上的传输电能,不仅有效提高了线路利用率,还可以将电能损耗降到最低。

2)故障恢复时E-WAN路由优化策略的对比分析。

为了进一步论证所提故障恢复工况下的最小损耗多源协同E-WAN路由优化策略的优越性,仍然选取12:00—13:00时段EER₂的路由优化进行分析。由于当前尚未有针对故障恢复工况的路由策略研究,故选取文献[12-13]中重负荷工况下多源协同路由优化策略进行对比,2种策略的技术差异性在于:本文所提最小损耗多源协同E-WAN路由优化策略可优先利用多电源为关键负荷传输电能,同时利用KKT条件求得满足约束的最小电能损耗传输方案;而文献[12-13]所提多源路由优化仅在单一电源无法满足负荷需求时,才会启用多端电源向负荷供电,不仅线路利用率不高,还会造成更高损耗。

对比结果如表4所示。需要注意的是,在该时段EER₂₂的上网电量为75.45 kW·h, EER₂的负荷需求仅为43.36 kW·h,按照文献[12-13]所提策略对EER₂供电时无需启用其他路径,实质上退化为单源路由,所以需对EER₇、EER₁₉、EER₂₂的上网电量进行适当缩减。

表4 故障恢复时,不同路由优化策略的对比分析

Table 4 Comparative analysis of different routing optimization strategies in fault recovery

路由优化策略	供电 EER	传输电能 / (kW·h)	电能损耗 / (kW·h)	电能总损耗 / (kW·h)
本文策略 (上网电量不变)	EER ₇	13.33	2.73	7.58
	EER ₁₉	10.46	1.42	
	EER ₂₂	27.15	3.43	
文献[12-13]的策略 (上网电量不变)	EER ₂₂	60.10	16.74	16.74
文献[12-13]的策略 ($P_{22_PPP,i}=50$ kW·h)	EER ₂₂	50.00	11.62	11.99
	EER ₁₉	5.35	0.37	
文献[12-13]的策略 ($P_{22_PPP,i}=30$ kW·h, $P_{19_PPP,i}=10$ kW·h)	EER ₂₂	30.00	5.18	8.16
	EER ₁₉	10.00	1.30	
	EER ₇	11.52	1.68	

由表4可见:采用本文所提最小损耗多源协同E-WAN路由优化策略,同时启动的供电电源为EER₇、EER₁₉、EER₂₂,对应的电能总损耗为7.58 kW·h。采用文献[12-13]所提多源协同路由优化策略时,若不限制上网电量,则启动的供电电源仅有EER₂₂,对应的电能总损耗可达16.74 kW·h;若限制EER₂₂的上网电量为50 kW·h,此时单凭EER₂₂难以满足EER₂的电能需求,所以EER₁₉被迫启用,对应的电能总损耗为11.99 kW·h;若继续限制EER₁₉的上网电量为10 kW·h,仅凭EER₂₂与EER₁₉难以满足EER₂的电能需求,所以EER₇被迫启用,对应的电能总损耗

为8.16 kW·h。3种仿真情况下,文献[12-13]所提路由优化策略与本文策略相比,电能总损耗分别增加了120.8%、58.2%和7.7%。通过限制上网电量,启用的电源在“被动”增加,损耗也在逐渐减少,这也论证了多源路由优化策略的优势。但即使3个供电电源全部启用后,文献[12-13]所提路由优化策略损耗仍然大于本文所提最小损耗多源协同路由优化策略。

综上所述,本文所提最小损耗多源协同E-WAN路由优化策略的优越性在于:与已有多源协同路由优化策略“被动”增加供电电源数量不同,本文策略通过“主动”增加供电电源数量,综合考虑了多端电源通过多条路径向单端负荷的电能传输;通过合理优化分配各电源出力,“均衡”各条路径上的传输电能,不仅有效提高了线路利用率,还可以把电能损耗降到最低。

5 结语

EER在配电网中的应用使得更高效的能量优化得以实现。然而目前的研究多侧重于配电网稳定运行工况下的能量优化策略,并未考虑故障恢复工况;此外,现有的上层E-WAN路由优化效果并不理想,线路功率不均衡,也造成了更大的电能损耗。为此本文提出了一种基于EER的配电网稳定运行与故障恢复分层能量优化策略,并通过仿真对比验证了策略的可行性、有效性与优越性,结论如下:

1)利用所提出的下层E-LAN内能量优化策略,在稳定运行时可以比不进行优化节约20%左右的成本,故障恢复时可以比稳定运行增加60%左右的上网电量;

2)利用所提出的上层E-WAN内EER间的路由优化策略,稳定运行时可以在保障可再生能源就地消纳的同时实现电能损耗最小化,故障恢复时可以在保障关键负荷优先供电的同时实现电能损耗最小化,最大程度保障关键负荷的存活;

3)所提出的2种最小损耗路由优化策略综合考虑了多条路径、多个电源的电能传输,通过合理分配各条路径上的传输电能,不仅有效提高了线路利用率,还使得不同路径传输电能更加“均衡”,将电能损耗降到最低。

在后续研究中,将通过多时间尺度逐级消纳可再生能源出力与负荷波动,引入超短期预测来消除预测误差,实现基于EER的配电网实时调度;此外,将利用多智能体分布式协同控制技术制定路由优化策略,进一步降低电能路由的信息量和计算工作量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郝丽丽,王辉,王国栋,等. 含分布式电源配电网运行风险的影响因素溯源[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):27-37.
HAO Lili, WANG Hui, WANG Guodong, et al. Influence factor tracing of operation risk for distribution network with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(1):27-37.
- [2] 朱俊澎,袁越,吴涵. 考虑移动氢储能和高密度可再生能源的主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):42-50.
ZHU Junpeng, YUAN Yue, WU Han. Optimal dispatch of active distribution network considering mobile hydrogen energy storage and high-density renewable energy sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(12):42-50.
- [3] 尹璐,易姝娟,张凯,等. 基于柔性环网控制装置的10 kV配电网运行方式[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):137-142.
YIN Lu, YI Shuxian, ZHANG Kai, et al. Operation mode of 10 kV distribution network with flexible looped network controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(1):137-142.
- [4] HUANG A. FREEDM system—a vision for the future grid [C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010:1-4.
- [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] 蒲天骄,刘克文,陈乃仕,等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3511-3521.
PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(14):3511-3521.
- [7] XIE Min, JI Xiang, HU Xintong, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution system with multi-microgrids[J]. Energy, 2018, 153:479-489.
- [8] 杨世博,孙亮,陈立东,等. 计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):15-23.
YANG Shibo, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(4):15-23.
- [9] WU Jiang, GUAN Xiaohong. Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013,4(4):2174-2181.
- [10] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng, et al. Decentralized energy management for networked microgrids in future distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,33(4):3599-3610.
- [11] 郭慧,汪飞,张笠君,等. 基于能量路由器的能源互联网分层分区优化[J]. 中国电机工程学报,2018,38(16):4726-4737.
GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Hierarchical and zonal optimization of the energy router based energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(16):4726-4737.
- [12] WANG Ruichi, WU Jiande, QIAN Zhongnan. A graph theory based energy routing algorithm in energy Local Area Network (e-LAN)[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017,13(6):3275-3285.
- [13] RAZI R, PHAM C, HABLY A, et al. A novel graph-based routing algorithm in residential multi-microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020,17(3):1774-1784.
- [14] WANG Shouxiang, LIU Qi, JI Xingquan. A fast sensitivity method for determining line loss and node voltages in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(1):1148-1150.
- [15] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013,28(2):911-919.
- [16] 马天祥,贾伯岩,卢志刚,等. 基于主从博弈理论的能源互联网配电网多能互补协调故障恢复方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):38-47.
MA Tianxiang, JIA Boyan, LU Zhigang, et al. Multi-energy complement and coordinated post-contingency recovery method of distribution energy networks based on master-slave game theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):38-47.
- [17] 郭慧,汪飞,张笠君,等. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3314-3325.
GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Technologies of energy router-based smart distributed energy network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(12):3314-3325.
- [18] 黄亚峰,毕大伟,李苑红. 基于LCOE原理家庭式光伏度电成本分析[J]. 东北电力大学学报,2019,39(3):1-7.
HUANG Yafeng, BI Dawei, LI Yuanhong. Analysis of family PV power cost based on LCOE principle [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019,39(3):1-7.
- [19] 涂炼,刘涤尘,廖清芬,等. 计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):40-46.
TU Lian, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(12):40-46.
- [20] 孟洪民,刘迪,李强,等. 考虑蓄电池健康的微电网群模型预测控制能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):88-95.
MENG Hongmin, LIU Di, LI Qiang, et al. Energy management strategy based on model predictive control of microgrid cluster considering battery health [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(6):88-95.
- [21] 中华人民共和国发展和改革委员会,国家能源局. 关于印发《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)》的通知[EB/OL]. (2018-10-30) [2021-03-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gfxwj/201812/t20181204_960958.html?code=&state=123.
- [22] 丁阳,汪泓,宾峰,等. 基于博弈论的多目标配电网重构[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):28-35.
DING Yang, WANG Feng, BIN Feng. Multi-objective distribution network reconfiguration based on game theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(2):28-35.

作者简介:



杜云飞

杜云飞(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用以及电力系统分析与优化运行(E-mail: yunfei_du@hust.edu.cn);

尹项根(1954—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、电力电子在电力系统中的应用(E-mail: xgyin@hust.edu.cn);

赖锦木(1990—),男,讲师,博士,通信作者,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: laijinmu@126.com)。

(编辑 任思思)

(下转第171页 continued on page 171)

Three-phase harmonic power flow algorithm of distribution network based on matrix paradigm

LIN Jinrong¹,ZHANG Yi¹,LI Chuandong²,SHAO Zhenguo¹,LI Kuanhong³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350007, China;

3. Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350009, China)

Abstract: The traditional power flow algorithm of distribution network is mainly based on the forward and backward algorithm, the complexity of the algorithm increases sharply and it is difficult to expand new model when the harmonics and three-phase imbalance are comprehensively considered, and the convergence of the algorithm is not good enough when the type of source changes. Based on three-phase fundamental wave power flow of Newton-Raphson method and three-phase harmonic admittance matrix, a three-phase power flow paradigm algorithm of distribution network is proposed, which comprehensively considers power quality problems and is suitable for various network structures. The efficient generation and random access method of three-phase harmonic admittance matrix and three-phase fundamental wave power flow matrix of Newton-Raphson is constructed by comprehensively using matrix transformation operations such as matrix inner product, matrix index and incidence matrix. On this basis, the structure of three-phase harmonic admittance matrix is updated combining with transformer and other models, and a flexible and efficient three-phase harmonic power flow algorithm is established. OpenDSS is used to verify the accuracy and validity of the proposed algorithm in IEEE 14-bus system. The proposed algorithm and the traditional forward and backward algorithm are compared in IEEE 123-bus system, it is verified that the proposed algorithm can improve the efficiency and deal with the ring network.

Key words: distribution network; three-phase harmonic; power quality; power flow calculation; matrix operation

(上接第164页 continued from page 164)

Hierarchical energy optimization based on electric energy router for distribution network in stable operation and fault recovery

DU Yunfei¹, YIN Xianggen¹, LAI Jinmu², WANG Zhen¹, HU Jiaxuan¹, YU Ji¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To solve the problem of lack of research on fault recovery and excessive loss of energy routing in distribution network energy optimization based on EER (Electric Energy Router), the hierarchical energy optimization strategy of distribution network based on EER is proposed considering both stable operation and fault recovery operation conditions, which includes energy optimization in lower-layer E-LAN (Energy Local Area Network) and energy routing optimization in upper-layer E-WAN (Energy Wide Area Network). For stable operation condition, the E-LAN energy optimization strategy to minimize the total operation cost is proposed, together with the E-WAN routing optimization strategy using for minimum loss local consumption, thus ensuring the local consumption of renewable energy and minimizing the power loss. For the fault recovery condition, the E-LAN energy optimization strategy to maximize the accumulated power on the grid is proposed, together with the E-WAN routing optimization strategy with minimum loss and multi-source cooperation is proposed, which can minimize the power loss and improve the load survival rate after fault while giving priority of power supply to the key load. Finally, the feasibility, effectiveness, and superiority of the proposed energy optimization strategy are verified through the simulation analysis and comparison based on the hierarchical distribution network model.

Key words: electric energy router; stable operation; fault recovery; hierarchical distribution network; energy optimization; routing optimization; key load

附录 A

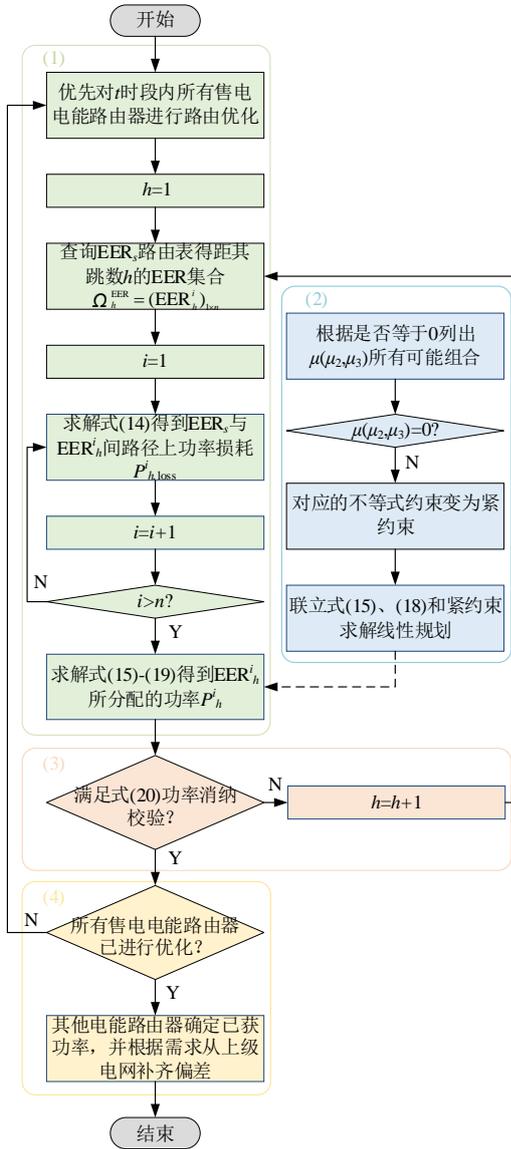


图 A1 稳定运行期间, t 时段内的 E-WAN 路由优化策略流程

Fig.A1 Flowchart of routing optimization strategy of E-WAN in stable operation period t

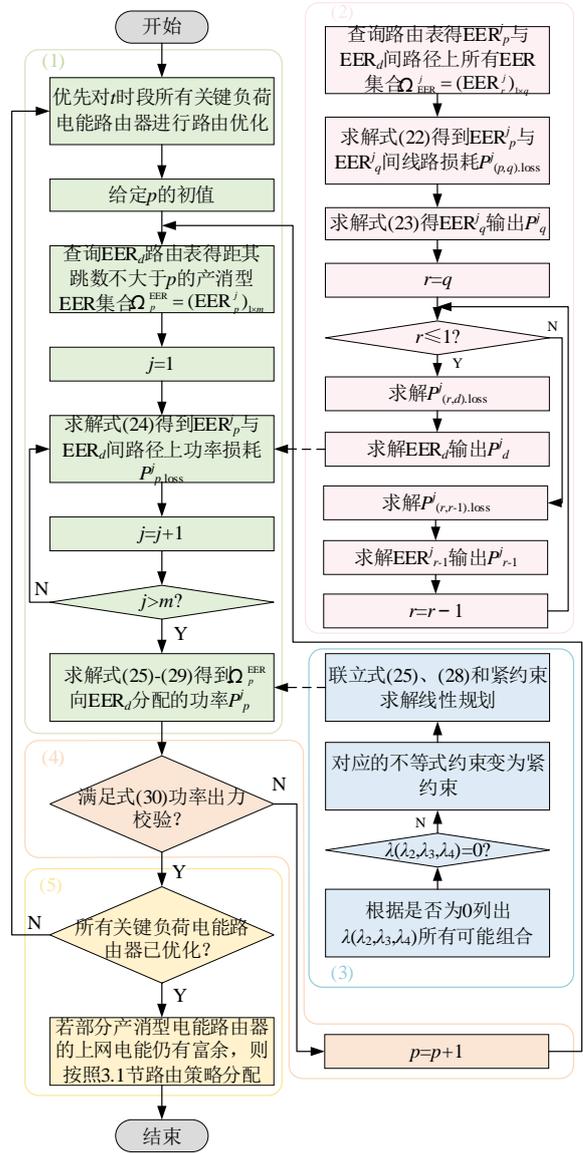


图 A2 故障恢复期间, t 时段内的 E-WAN 路由优化策略流程

Fig.A2 Flowchart of routing optimization strategy of E-WAN fault recovery period t

附录 B

表 B1 目标函数与约束条件基本参数

Table B1 Basic parameters of objective function and constraint condition

目标函数 基本参数	光伏 LCOE	风机 LCOE	储能运维成本
	$C_{pv} [\$ \cdot (\text{kW h}^{-1})]$	$C_w [\$ \cdot (\text{kW h}^{-1})]$	$C_{bat} [\$ \cdot (\text{kW h}^{-1})]$
	0.18	0.13	0.08
约束条件 基本参数	最大交换功率	最大充电功率	最大放电功率
	P_{net_max}/kW	P_{cha_max}/kW	P_{dis_max}/kW
	60	20	20
	V_{min}^{SOC}	V_{max}^{SOC}	SOC 初始值
	0.1	0.9	0.3

表 B2 不同 E-LAN 内接入的光伏风机数

Table B2 Number of PV and wind turbines connected in different E-LANs

EER	光伏模块	风电机组	EER	光伏模块	风电机组
EER ₇	20	10	EER ₂₂	20	20
EER ₁₆	16	15	EER ₂₉	10	5
EER ₁₉	10	15	EER ₃₂	10	5

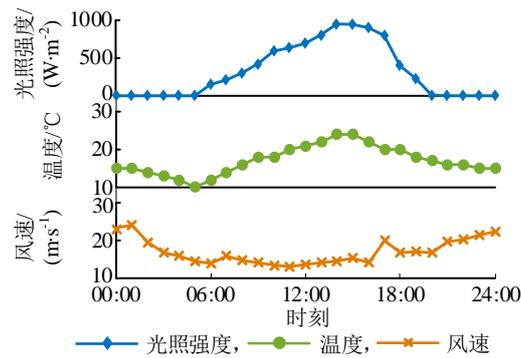


图 B1 某地一天内的光照强度、温度、风速曲线

Fig.B1 Light intensity, temperature, and wind speed curves for a given location within one day

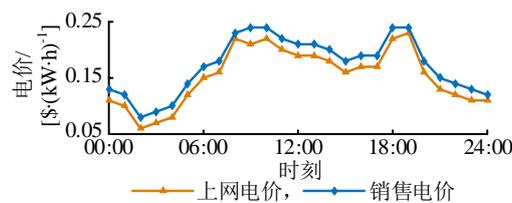
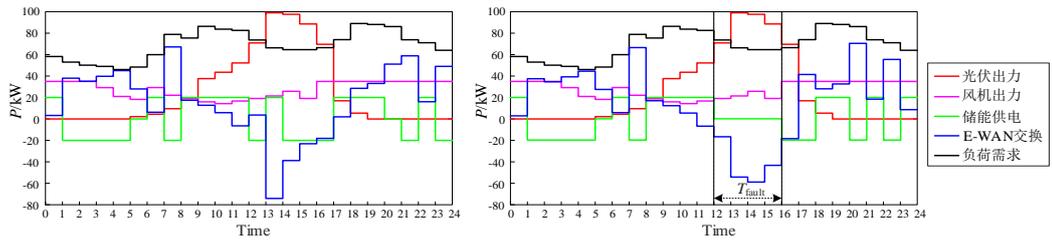
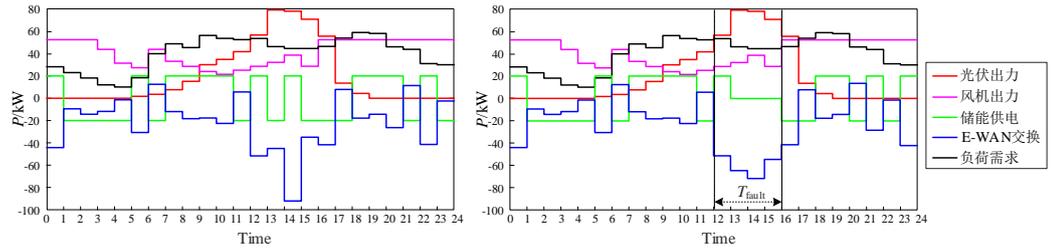


图 B2 某地一天内的上网电价和销售电价

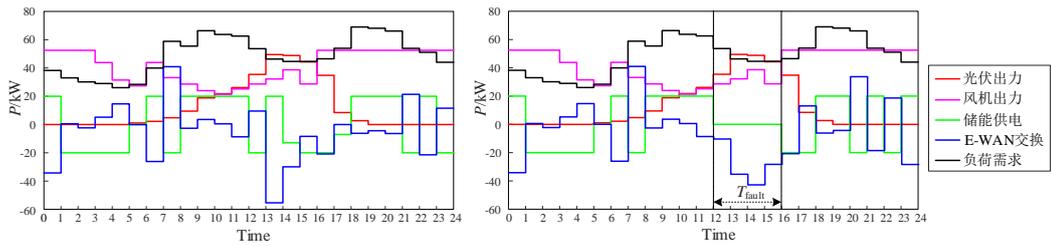
Fig.B2 Pool purchase price and retail power price for a given location within one day



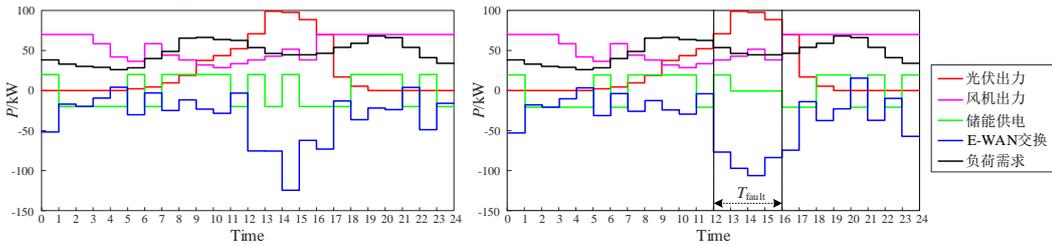
(a) EER₇ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果



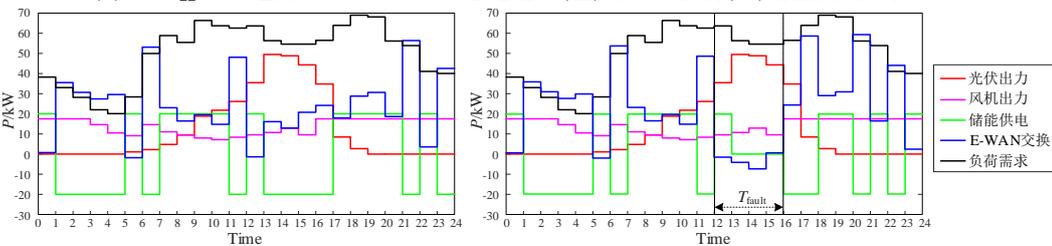
(b) EER₁₆ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果



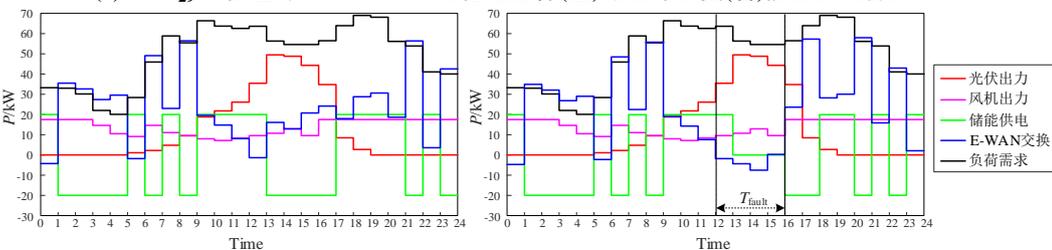
(c) EER₁₉ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果



(d) EER₂₂ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果



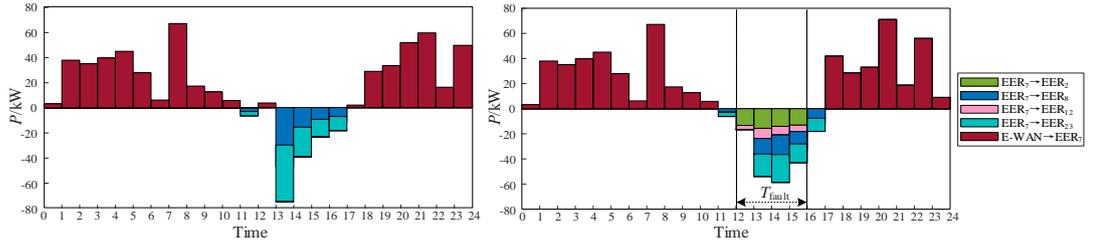
(e) EER₂₉ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果



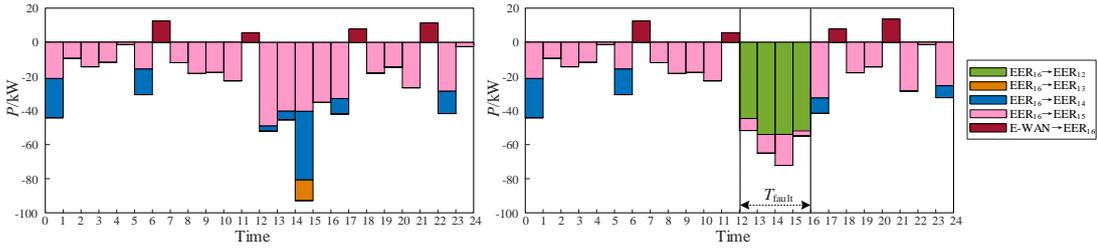
(f) EER₃₂ 所管理的 E-LAN 一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)能量优化仿真结果

图 B3 产消型电能路由器所管理的 E-LAN 能量优化仿真结果

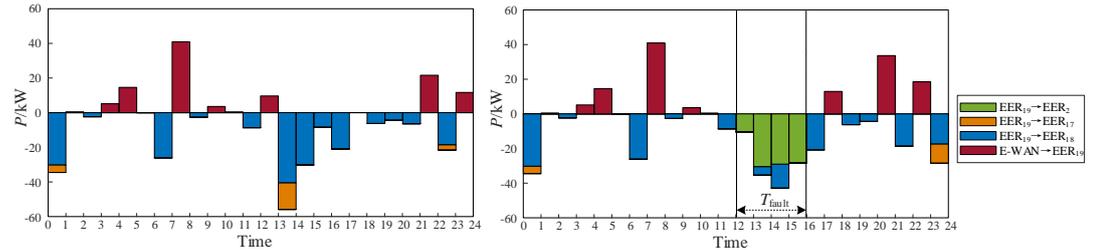
Fig.B3 Simulative results of energy optimization in E-LAN managed by prosumer EER



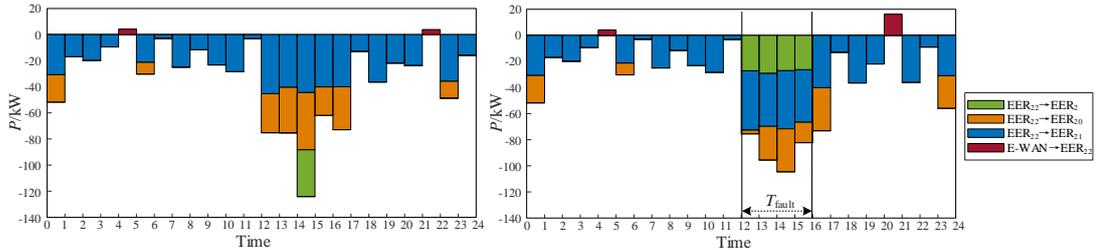
(a) EER₇一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果



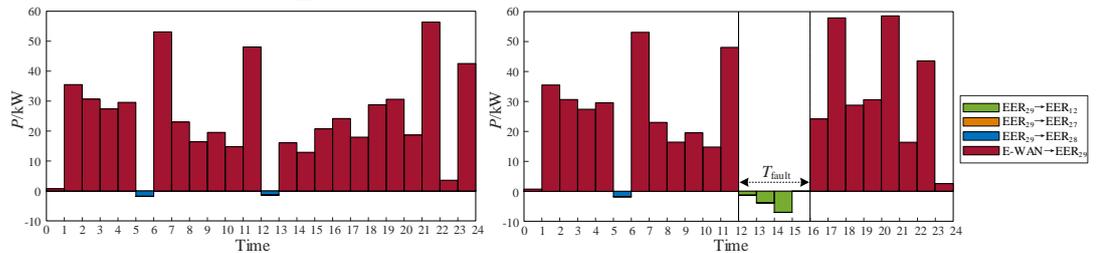
(b) EER₁₆一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果



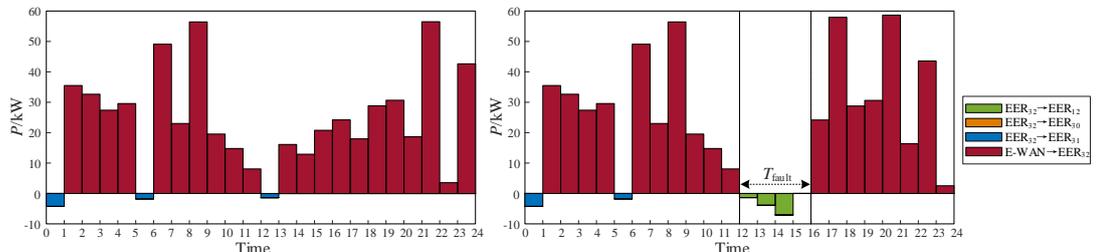
(c) EER₁₉一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果



(d) EER₂₂一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果



(e) EER₂₉一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果



(f) EER₃₂一天内稳定运行(左)与故障恢复(右)路由优化仿真结果

图 B4 调度中心所管理的 E-WAN 路由优化仿真结果

Fig.B4 Simulative results of routing optimization in E-WAN managed by power dispatching center

表 B3 E-WAN 内各线路电阻阻值

Table B3 Resistance value of each line within E-WAN

线路	阻值	线路	阻值	线路	阻值	线路	阻值	线路	阻值	线路	阻值
1-2	0.4930	7-8	1.0300	13-14	0.1910	2-20	0.1512	25-26	0.8042	31-32	0.6078
2-3	0.3660	8-9	1.0443	14-15	0.2463	20-21	0.2980	12-27	0.5075		
3-4	0.3811	9-10	1.8966	15-16	0.1890	21-22	0.2960	27-28	0.9744		
4-5	0.8190	10-11	1.3744	2-17	0.1640	7-23	0.7030	28-29	0.6105		
5-6	0.1872	11-12	1.4680	17-18	1.5042	23-24	0.2842	12-30	0.8544		
6-7	0.7114	12-13	0.2416	18-19	0.4095	8-25	1.0590	30-31	0.6774		

表 B4 E-WAN 内各 EER 端口效率

Table B4 Efficiency of each EER port within E-WAN

EER	端口	效率	EER	端口	效率	EER	端口	效率	EER	端口	效率	EER	端口	效率
EER ₁	1-0	0.98	EER ₇	7-6	0.99	EER ₁₃	13-12	0.97	EER ₂₀	20-2	0.97	EER ₂₇	27-12	0.98
	1-1	0.97		7-7	0.96		13-13	0.99		20-20	0.95		27-27	0.97
	1-2	0.99		7-8	0.98		13-14	0.98		20-21	0.99		27-28	0.99
EER ₂	2-1	0.97	EER ₈	8-7	0.97	EER ₁₄	14-13	0.95	EER ₂₁	21-20	0.98	EER ₂₈	28-27	0.98
	2-2	0.98		8-8	0.98		14-14	0.96		21-21	0.98		28-28	0.99
	2-3	0.99		8-9	0.99		14-15	0.99		21-22	0.97		28-29	0.99
	2-17	0.99	EER ₉	9-8	0.96	EER ₁₅	15-14	0.98	EER ₂₂	22-21	0.97	EER ₂₉	29-28	0.96
	2-20	0.99		9-9	0.96		15-15	0.97		22-22	0.96		29-29	0.98
EER ₃	3-2	0.98	EER ₁₀	10-9	0.98	EER ₁₆	16-15	0.98	EER ₂₃	23-7	0.98	EER ₃₀	30-12	0.95
	3-3	0.99		10-10	0.98		16-16	0.99		23-23	0.98		30-30	0.96
	3-4	0.97		10-11	0.97		17-2	0.96		23-24	0.97		30-31	0.99
EER ₄	4-3	0.97	EER ₁₁	11-10	0.96	EER ₁₇	17-17	0.96	EER ₂₄	24-23	0.96	EER ₃₁	31-30	0.97
	4-4	0.95		11-11	0.96		17-18	0.97		24-24	0.99		31-31	0.98
	4-5	0.96		11-12	0.97		18-17	0.98		25-8	0.98		31-32	0.96
EER ₅	5-4	0.95	EER ₁₂	12-11	0.96	EER ₁₈	18-18	0.96	EER ₂₅	25-25	0.97	EER ₃₂	32-31	0.97
	5-5	0.97		12-12	0.98		18-19	0.97		25-26	0.97		32-32	0.99
	5-6	0.98		12-13	0.97		19-18	0.98		26-25	0.96			
EER ₆	6-5	0.98	EER ₁₉	12-27	0.96		19-19	0.99						
	6-6	0.99		12-30	0.96									
	6-7	0.97												

注：端口 *a-a* 表示电能路由器与 E-LAN 内所接负荷/分布式电源之间的端口；为了简化分析，各端口效率都被抽象为 0.95~0.99 间的常系数，且同一端口的输入效率与输出效率近似相等。