

基于主从博弈理论的能源互联配电网 多能互补协调故障恢复方法

马天祥¹, 贾伯岩¹, 卢志刚², 程肖³, 王代远⁴

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 燕山大学 河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 河北省送变电有限公司, 河北 石家庄 050051;

4. 国网河北省电力有限公司 石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要:针对能源互联配电网故障恢复的问题,采用主从博弈理论进行建模,所建立的能源互联配电网故障恢复模型计及了多个能源子网之间的多能互补协调。以发生故障后电能子网开关状态为主体博弈者的策略,以能源互联配电网故障恢复后系统的失电负荷量最小为主体博弈者的支付;以包括电能子网、热能子网、气能子网以及交通子网在内的各能源子网优化运行计划调整为从体博弈者的策略,以系统在故障期间综合运行成本最小为从体博弈者的支付,并计及各能源子网运行的必要约束。主体博弈者在提供故障发生后开关状态的同时从体博弈者对能源互联配电网的优化运行计划进行调整。仿真算例表明,能源互联配电网相比于传统配电网,系统在故障恢复之后的运行经济性以及可靠性均更高。

关键词:能源互联配电网;故障恢复;主从博弈;多能互补协调;失电负荷指标

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004020

0 引言

能源互联网强调多种能源形式间的综合互补利用,但相较于其他能源形式,电能有瞬发、瞬供特性,故未来能源互联网必然将以电能为主体形式、以智能电网为主要载体的能源生态系统^[1-3]。作为能源互联网的重要形式和组成模块,能源互联配电网是一个更广泛的分布式互联系统。能源互联配电网指以电力系统为中心,借助信息化设备,横向实现电、气、热、可再生能源等“多源互补”,纵向实现“源、网、荷、储”各环节高度协调的区域性能量平衡系统^[4]。能源互联配电网将能量流、信息流和业务流进行深度耦合,形成了一个全新的能源体系,并形成了能源应用的新形式。能源互联配电网故障恢复方法作为其重要的关键技术之一,是一个必要的研究课题。

目前已有较多文献对配电网故障恢复问题进行了研究。一方面,部分研究比较侧重于针对配电网具体的运行环境和条件建立其故障恢复模型,如文献^[5]建立了基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复模型;文献^[6]考虑了含光伏发电并网的

配电网故障恢复模型,并且计及了光伏出力的不确定性;文献^[7]提出了配电网故障恢复的区间数灰色关联决策方法。文献^[8-9]针对主动配电网的故障恢复问题进行了研究并取得了成果。配电网故障恢复是一个多目标、多约束的非线性优化问题,最终得到的解是一系列开关状态组合^[10]。另一方面,部分研究侧重于寻求针对故障恢复模型的高效求解算法。如传统的配电网故障恢复求解方法^[11]主要有启发式搜索方法和遗传算法^[12-13]、禁忌搜索算法^[14],近年来蚁群算法^[15]、多代理理论^[16]等智能优化方法也开始应用于配电网故障恢复领域。然而,目前仍很少有文献针对能源互联配电网的故障恢复问题提出合理的解决方法。

相比于传统的配电网,能源互联配电网最基本的运行特点是多能互补协调。包括配电网在制定故障恢复计划时其核心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。对于能源互联配电网而言,不仅可以通过改变开关状态集来实施故障恢复方案,还可以通过多能互补协调并基于能源耦合设备对配电网提供支撑,降低故障恢复的难度,减少失电负荷量。能源互联配电网在制定故障恢复计划时,需要同时制定开关状态变化方案并对系统的运行方案进行调整,然而对系统运行方案的调整依赖于开关状态的制定,因此两者在故障恢复过程中的地位不同。本文提出一种将故障恢复决策中开关状态与系统优化运行计划作为不同地位决策者进行动态博弈的模型,即基于主从

收稿日期:2019-07-26;修回日期:2020-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873225);河北省自然科学基金京津冀合作专项项目(F2016203507);国网河北省电力有限公司资助项目(kj2019-068)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61873225),Beijing Tianjin Hebei Cooperation Project of Hebei Natural Science Foundation(F2016203507) and the State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd.(kj2019-068)

博弈模型的能源互联配电网故障恢复方法。

本文针对多能互补协调下能源互联配电网故障恢复问题,考虑到模型中不同控制变量地位的不同,将开关状态变量制定和系统运行方案调整作为不同的决策主体,用主从博弈理论进行建模。主体博弈者和从体博弈者的策略之间相互影响和耦合,通过博弈过程制定系统的开关状态集和调整优化运行计划。最后,通过仿真算例验证了能源互联配电网相比于传统配电网在故障恢复期间的供电可靠性更高。

1 能源互联配电网故障恢复原理

能源互联配电网的基本组成模块及系统多能互补协调机理如图1所示。

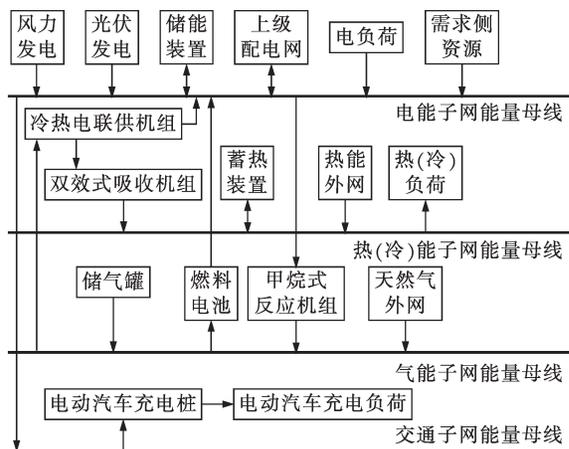


图1 能源互联配电网组成模块及多能互补协调机理

Fig.1 Composition module of distribution energy network and multi-energy complementary and coordination mechanism

从图1中可以看出,能源互联配电网由电管网、热管网、气管网以及交通子网等模块组成,每个模块的运行既联系密切又具有一定的独立性,能源互联配电网中的设备都依据其运行特性划分到各能源子网中。

主从博弈作为一种非合作动态博弈,能够模拟在信息不对称情况下多个决策主体之间相互影响的优化问题^[17]。目前已有较多文献对主从博弈理论进行了研究和应用,如文献[18]将主从博弈应用在智能小区代理商的定价及购电策略中代理商和车主的博弈;文献[19]对博弈论在电力系统的应用进行了系统论述;文献[20]提出一种将分时电价和风储系统作为不同地位决策者进行动态博弈优化的主从博弈模型。然而,目前仍很少有文献将主从博弈应用于配电网故障恢复方法的建模中。传统优化方法具有不利于揭示模型的主要矛盾、控制变量互相耦合、不利于实际系统的开发和拓展等缺点,而主从博弈

通过对控制变量的划分揭示了模型的主要矛盾,具备清晰化物理含义、在实际中便于系统拓展、降低模型求解难度等优点。

能源互联配电网基于主从博弈理论的系统故障恢复原理架构如图2所示。

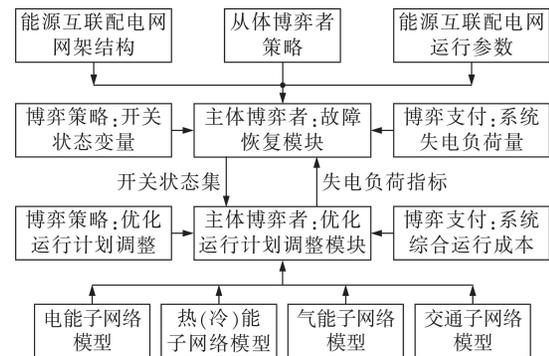


图2 基于主从博弈理论的系统故障恢复原理架构

Fig.2 Principle architecture of system fault recovery based on master-slave game theory

从图2中可以看出,主体博弈者作为故障恢复模块,其博弈策略为开关状态集,博弈支付为系统失电负荷量,所制定的系统在故障发生后的开关状态集是从体博弈者制定策略的基础;从体博弈者在主体博弈者提供的开关状态集的前提下以系统综合运行成本最小为博弈支付对系统优化运行计划进行调整,并将该策略下的系统失电负荷指标反馈给主体博弈者。两者的策略之间相互影响和耦合,主体博弈者通过自身的策略影响从体博弈者的策略从而间接决定自身的博弈支付,在整个博弈过程中处于主导地位。

主从博弈的上层参与者具体对应故障恢复系统的开关状态集模块,在实际中可以是配电网自动化系统中开关状态集制定模块,该模块为一系列程序,还包括开关状态遥信采集、开关状态遥控预置、智能单元合并等功能,而从体博弈者可以是配电网自动化系统中的能量管理模块。两者通过设计合理的接口和调用机制就可以实现基于主从博弈理论的配电网故障恢复方法。

2 主体博弈者模型

2.1 博弈策略与支付

故障恢复决策中主体博弈者为系统故障恢复中心,其博弈策略 S_1 为能源互联配电网中开关状态,将博弈主体的策略集写为数学形式,如式(1)所示。

$$S_1 = \{g(1), g(2), \dots, g(i), \dots, g(M)\} \quad (1)$$

其中, $g(i)$ 为开关 i 的位置状态,当 $g(i) = 1$ 时表示开关 i 合位,当 $g(i) = 0$ 时表示开关 i 分位; M 为开关数目。

主体博弈者的支付为最小化故障持续时间内失电负荷功率最小,该支付如式(2)所示。

$$\min u_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N r_j(t) c_j P_j(t) \quad (2)$$

其中, u_1 为博弈支付; T 为故障持续时段数; N 为能源互联配电网的负荷节点数; $r_j(t)$ 为故障恢复后第 t 时段是否对第 j 个负荷节点进行负荷中断的 0-1 变量, 当 $r_j(t) = 1$ 时表示进行中断, 当 $r_j(t) = 0$ 时表示不进行中断; c_j 为第 j 个负荷节点的重要程度权重; $P_j(t)$ 为第 t 时段第 j 个负荷节点的负荷中断功率。

2.2 博弈约束条件

2.2.1 配电网结构辐射状约束

主体博弈者在制定开关状态变化集时, 需要满足配电网拓扑结构的辐射状约束, 该约束如式(3)所示^[21]。

$$g \in G \quad (3)$$

其中, g 为故障恢复后配电网的拓扑结构, 由故障恢复中心制定开关状态变量构成; G 为满足辐射状拓扑结构的配电网结构集合。

2.2.2 节点电压约束

故障恢复之后的系统需要满足节点电压约束, 如式(4)所示。

$$U_{i,\min} \leq U_i(t) \leq U_{i,\max} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

其中, $U_i(t)$ 为第 t 时段负荷节点 i 的电压幅值; $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别为第 i 个节点的电压幅值下限和上限。式(4)中负荷节点电压由式(5)所示的系统潮流平衡约束得到, 该约束对任意故障持续期间的时段均成立^[22]。

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

其中, P_i 和 Q_i 分别为第 i 个节点注入的有功和无功功率, 其受到从体博弈者策略的影响; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间线路的电导、电纳和电压相角差; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值。

2.2.3 支路容量约束

通过系统潮流平衡同时得到配电网各支路的容量, 以上容量需要满足支路容量约束如式(7)所示。

$$P_l \leq P_{l,\max} \quad (7)$$

其中, P_l 为支路 l 的有功功率; $P_{l,\max}$ 为支路 l 的容量上限。

2.2.4 开关操作次数约束

在故障恢复过程中, 开关将会进行频繁操作, 为了不对开关使用寿命造成显著影响, 需要满足如式(8)所示的约束。

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M R_j(t) \leq R_{\max} \quad (8)$$

其中, $R_j(t)$ 为开关 j 在第 t 时段是否进行了变位操作的 0-1 变量, 若进行了变位操作则 $R_j(t) = 1$, 否则 $R_j(t) = 0$; R_{\max} 为故障持续期间允许的最大操作次数。

3 从体博弈者模型

3.1 博弈策略与支付

从体博弈者为能源互联配电网优化运行模块, 其策略集 S_2 为故障持续周期内系统的运行计划, 如式(9)所示。

$$S_2 = \{P_{SB}, P_{EX}, H_{IN}, H_X, P_{MT}, G_{IN}, G_S, P_{FC}, P_V\} \quad (9)$$

其中, P_{SB} 、 P_{EX} 、 H_{IN} 、 H_X 、 P_{MT} 、 G_{IN} 、 G_S 、 P_{FC} 和 P_V 分别为能源互联配电网中电储能充放电功率计划、与外网购售电功率计划、向热(冷)能外网购热功率计划、蓄能装置充放热计划、冷热电联供(CCHP)型微燃机(MT)出力计划、外网输入天然气量计划、储气罐充放气计划、燃料电池(FC)出力计划和电动汽车充放电功率计划。

从体博弈者的支付为最小化故障持续期间的系统运行成本, 该支付如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \min u_2 = \Delta t \sum_{t=1}^T & [f_{MT}(P_{MT}(t)) + f_{FC}(P_{FC}(t)) + P_{loss}(t) + \\ & \sum_{i=1}^K f_{OM,i}(|P_i(t)|) + P_{EX}(t)q(t) + \\ & c^\theta (\lambda_{MT}^\theta P_{MT}(t) + \lambda_{FC}^\theta P_{FC}(t)) - FP_{PV}(t) + \\ & \beta q(t)P_{cut}(t) + H_{IN}(t)p_h + G_{IN}(t)c_{NG}] \quad (10) \end{aligned}$$

其中, u_2 为从体博弈者的支付; Δt 为运行时段的时长; $f_{MT}()$ 和 $f_{FC}()$ 分别为 MT 和 FC 的燃料成本函数; $P_{MT}(t)$ 和 $P_{FC}(t)$ 分别为第 t 时段 MT 和 FC 的发电功率; $P_{loss}(t)$ 为第 t 时段系统电功率损耗; $f_{OM,i}()$ 为设备 i 的运维费用函数; K 为设备数目; $P_i(t)$ 为第 t 时段设备 i 的运行功率; $P_{EX}(t)$ 为第 t 时段系统与外网的购售电功率; $q(t)$ 为第 t 时段外网分时电价; R 为污染物种类数; λ_{MT}^θ 和 λ_{FC}^θ 分别为 MT 和 FC 的第 θ 种污染物的排放系数; c^θ 为第 θ 种污染物的环境成本折算系数; F 为政府对光伏发电的补贴系数; $P_{PV}(t)$ 为第 t 时段光伏发电出力; β 为负荷中断补偿系数; $P_{cut}(t)$ 为第 t 时段负荷中断功率; $H_{IN}(t)$ 为第 t 时段热(冷)能子网络向外网的购热功率; p_h 为购热成本系数; $G_{IN}(t)$ 为第 t 时段气能子网络向外网的购气功率; c_{NG} 为天然气价格。

3.2 博弈约束条件

3.2.1 电能子网络运行约束

电能子网络运行约束包括电能功率平衡约束(如式(11)所示)以及微电源相关运行约束(如式(12)所示)。

$$\begin{aligned}
& P_{EX}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{FC}(t) + \\
& P_{SB}(t) + P_{cut}(t) = P_{loss}(t) + P_L(t) + \bar{P}_V(t) \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{cases}
P_{SB}^{\min} \leq P_{SB}(t) \leq P_{SB}^{\max} \\
S_{SB}^{\min} \leq S_{SB}(t) \leq S_{SB}^{\max} \\
S_{SB}(t+1) = \begin{cases} S_{SB}(t) - P_{SB}(t)\Delta t/\eta_{dis} - \Delta P_{SB} & P_{SB}(t) > 0 \\ S_{SB}(t) - P_{SB}(t)\Delta t\eta_{ch} - \Delta P_{SB} & P_{SB}(t) < 0 \end{cases} \\
P_{grid}^{\min} \leq P_{EX}(t) \leq P_{grid}^{\max} \\
P_{MT}^{\min} \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max} \\
P_{FC}^{\min} \leq P_{FC}(t) \leq P_{FC}^{\max}
\end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases}
G_{IN}(t) + G_s(t) = \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}(t)Q_{LHV}} + G_L(t) \\
Q_s(t) = Q_s(t-1) - G_s(t) \\
Q_s^{\min} \leq Q_s(t) \leq Q_s^{\max} \\
G_s^{\min} \leq G_s(t) \leq G_s^{\max} \\
G_l^{\min} \leq G_l(t) \leq G_l^{\max}
\end{cases} \quad (14)$$

其中, $P_L(t)$ 为第 t 时段系统电负荷水平; $\bar{P}_V(t)$ 为交通子网络在采用充电调整策略之后的第 t 时段充电负荷; ΔP_{SB} 为单位调度时段内储能自耗电功率, 且 $\Delta P_{SB} = \Delta t D_{SB} Q_{SB}$, D_{SB} 为储能自放电系数, Q_{SB} 为储能容量; $S_{SB}(t)$ 和 $S_{SB}(t+1)$ 分别为第 t 和第 $t+1$ 时段末剩余电量; η_{dis} 和 η_{ch} 分别为放电效率和充电效率; S_{SB}^{\min} 、 S_{SB}^{\max} 分别为剩余电量允许最小值和最大值; P_{SB}^{\min} 、 P_{SB}^{\max} 分别为储能充放电最小值和最大值; P_{MT}^{\min} 和 P_{MT}^{\max} 分别为 MT 发电功率最小值和最大值; P_{FC}^{\min} 和 P_{FC}^{\max} 分别为 FC 发电功率最小值和最大值。

3.2.2 热(冷)能子网络运行约束

热(冷)能子网络的运行约束包括热能功率平衡约束、冷能功率平衡约束、蓄能装置运行约束以及向外网购热功率约束, 如式(13)所示。

$$\begin{cases}
\frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}(t)}(1-\eta_{MT}(t))C_{he} + H_x(t) = P_{he}(t) \\
\frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}(t)}(1-\eta_{MT}(t))C_{co} + H_x(t) = P_{co}(t) \\
X(t) = X(t-1) - \frac{H_x(t)}{\eta_x} - \lambda_x \Delta t \\
H_{IN}^{\min} \leq H_{IN}(t) \leq H_{IN}^{\max}
\end{cases} \quad (13)$$

其中, $\eta_{MT}(t)$ 为 MT 的发电效率; C_{he} 和 C_{co} 分别为双效吸收式机组的制热系数、制冷系数; $P_{he}(t)$ 和 $P_{co}(t)$ 分别为第 t 时段热负荷和冷负荷功率; $H_x(t)$ 为第 t 时段蓄能装置充放热功率, $H_x(t) > 0$ 时表示释放能量, $H_x(t) < 0$ 时表示吸收能量; $X(t)$ 和 $X(t-1)$ 分别为第 t 和第 $t-1$ 时段蓄能装置剩余能量; λ_x 为蓄能装置能量自损失系数; η_x 为充放热效率; H_{IN}^{\min} 和 H_{IN}^{\max} 分别为热量子网络向外网购热的最小和最大功率。当蓄能装置运行在制热模式和制冷模式时分别满足式(13)中的第一项和第二项约束。

3.2.3 气能子网络运行约束

气能子网络运行需要同时满足天然气平衡约束、储气罐运行约束以及输气管道运行约束, 如式(14)所示。

其中, $G_{IN}(t)$ 为第 t 时段系统向外网购气量; $G_s(t)$ 为第 t 时段储气罐气体释放量; $G_L(t)$ 为第 t 时段天然气负荷; $\eta_{FC}(t)$ 为第 t 时段 FC 发电效率; Q_{LHV} 为天然气热值; $Q_s(t)$ 和 $Q_s(t-1)$ 分别为第 t 和第 $t-1$ 时段储气罐气体剩余量; $G_s(t)$ 为第 t 时段储气罐气体释放量, $G_s(t) > 0$ 时表示放气; Q_s^{\min} 和 Q_s^{\max} 分别为储气罐气体剩余量最小值和最大值; G_s^{\min} 和 G_s^{\max} 分别为储气罐气体释放量最小值和最大值; $G_l(t)$ 为第 t 时段气网第 l 条输送管道的输送气体量; G_l^{\min} 和 G_l^{\max} 分别为第 l 条输送管道的输送气体量最小值和最大值。

3.2.4 交通子网络电动汽车充电策略调整

假设 $v(i)$ 为电动汽车 i 需要完成充电的时段, Δv 为电动汽车充电持续时长, 则交通子网络采用的故障持续状态下电动汽车充放电计划调整策略如下: 对于任意电动汽车 i , 如果 $v(i) \leq T$, 则充电计划不做调整; 如果 $v(i) \geq T + \Delta v$, 则将电动汽车 i 的充电负荷平移到 $[T, T + \Delta v]$ 任意时段内; 如果 $T < v(i) < T + \Delta v$, 则将时段 $[v(i) - \Delta v, T]$ 内的充电负荷平移到时段 $[v(i), T + \Delta v]$ 内。假设采用以上调整策略之后的充电负荷为 $\bar{P}_V(t)$, 引入到电量子网络的功率平衡约束中。

电动汽车充电站网络作为有较大储能特性以及充电负荷需求曲线改善空间的特殊负荷, 能够单独对其进行有序充电管理以及需求侧管理, 这在能源互联配电网故障恢复方案中能够提供较好的支撑, 也是能源互联配电网在面临故障时具备更优可靠性的因素之一。

4 主从博弈均衡点分析

博弈模型的基本元素为博弈主体、博弈策略和博弈支付。与一般博弈不同的是, 在主从博弈中主体博弈者知晓从体博弈者的策略, 在制定自身策略之后计及从体博弈者对该策略的反应, 从而进一步优化自身策略^[23]。可以得到本文建立的主从博弈综合模型如式(15)所示。

$$W = \{O; S_1, S_2; u_1, u_2\} \quad (15)$$

其中, $O = \{1, 2\}$, 为博弈的参与者集合, 包括主体博弈者和从体博弈者; $S = \{S_1, S_2\}$, 为博弈者的策略集; $u = \{u_1, u_2\}$, 为博弈者的支付集。并且 $u_1 = u_1(x, y)$, $u_2 = u_2(x, y)$, 其中 $x \in S_1, y \in S_2$ 。

当主体博弈者选择了策略 $x \in S_1$ 时,从体博弈者对该策略的回应集如式(16)所示。

$$K(x) = \{w \in S_2 : u_2(x, w) = \inf_{v \in S_2} u_2(x, v)\} \quad (16)$$

其中, $K(x)$ 为从体博弈者对主体博弈者策略 x 的回应集。从体博弈者将从 $K(x)$ 中选择策略。

主体博弈者知晓从体博弈者的回应集,因此从体博弈者将会调整自身的策略为 $x^* \in S_1$,使得式(17)成立。

$$\inf_{x \in S_1} u_1(x^*, y) = \inf_{x \in S_1} \inf_{y \in K(x)} u_1(x, y) \quad (17)$$

在主体博弈者选择策略 $x^* \in S_1$ 时,从体博弈者将会选择策略 $y^* \in K(x^*)$,则称 (x^*, y^*) 为该主从博弈的 Nash 均衡点。在该均衡点以外对于 $\forall (x, y) \in (S_1, S_2)$, 均有 $u_1(x^*, y^*) \leq u_1(x, y)$; 对于 $\forall (x^*, y) \in (S_1, S_2)$, 均有 $u_2(x^*, y^*) \leq u_2(x^*, y)$ 。

5 模型求解流程

本文基于混沌粒子群优化算法分别设计主体博弈者和从体博弈者的求解流程,其中主体博弈者模块为故障恢复模块,从体博弈者为优化运行模块。主体博弈者求解流程如下。

(1) 输入能源互联配电网的网络拓扑结构、故障信息。

(2) 设置混沌粒子群优化算法的参数,包括惯性权重、学习因子、混沌搜索代数等。以开关状态集为位置信息初始化粒子种群。

(3) 检测初始种群所代表的故障恢复方案是否满足辐射状约束,并除去不符合的个体。

(4) 调用从体博弈者求解流程,得到每个粒子对应的失电负荷指标。

(5) 通过从体博弈者反馈的系统运行方案进行潮流计算,进而得到主体博弈者约束条件成立的情况,将约束条件通过罚函数形式引入到目标函数中得到粒子适应度函数。

(6) 更新当前全局最优解,对种群进行位置和速度更新,并对当前全局最优粒子在设置的范围内进行混沌搜索。

(7) 如果达到最大迭代次数则算法结束,否则判断全局最优解是否收敛。如果收敛则算法结束并输出结果,否则返回步骤(3)。

对于主体博弈者而言,是可以调用从体博弈者求解流程的。从体博弈者的求解流程如下。

(1) 输入能源互联配电网的网络拓扑结构、供电设备配置信息以及主体博弈者提供的开关状态集信息。

(2) 设置混沌粒子群算法的参数,包括惯性权重、学习因子、混沌搜索代数等。以故障期间系统运行方案为位置信息初始化粒子种群。

(3) 针对每个粒子对应的运行计划,以综合运行成本为目标函数进行计算,并将约束条件以罚函数形式引入到目标函数中得到适应度函数。

(4) 更新全局最优解,对种群采用文献[24]中的方式进行位置和速度更新,并对当前全局最优粒子在设置的范围内进行混沌搜索。

(5) 如果达到最大迭代次数则算法结束,否则判断全局最优解是否收敛。如果收敛则算法结束并输出失电负荷指标反馈给主体博弈者,否则返回步骤(3)。

6 算例分析

6.1 算例设置

本文以图3所示的典型能源互联配电网作为算例模型进行仿真验证,其中热能子网络和气能子网络的结构参考图1中的模型。该系统以 IEEE 33 节点配电系统为基础,计及热能子网络、气能子网络以及交通子网络与电电子网络的互补协调运行。系统中,支路 20-7、21-11、8-14、24-28、32-17 为联络支路。

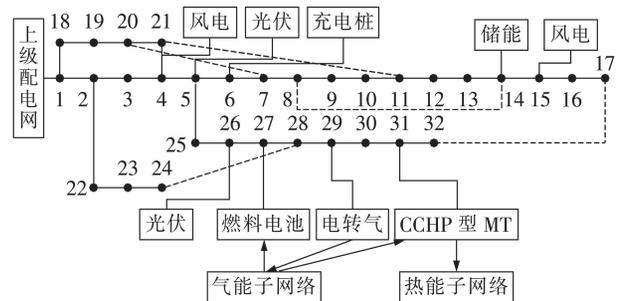


图3 典型能源互联配电网网架结构图

Fig.3 Grid structure diagram of typical distribution energy network

模型参数如下:天然气单价 $C_{NG} = 2.06$ 元 / m^3 , 分布式光伏发电的补贴价格 $F = 0.42$ 元 / ($kW \cdot h$), 负荷中断补偿系数 $\beta = 3$, 储能放电效率 η_{dis} 和储能充电效率 η_{ch} 均为 0.88, 储能自放电系数 $D_{sb} = 0.1$, 储能容量 $Q_{sb} = 1000$ $kW \cdot h$, 环境折算成本系数参考文献[24], 蓄能装置剩余热量(冷量)的自损失系数 $\lambda_x = 0.1$, 储气罐容量 $Q_s^{max} = 400$ m^3 , 分时电价水平参考文献[20]。系统中各个节点所接入设备的情况和能源互联配电网中电电子网络的负荷等级情况具体见附录。

本文针对3种方式下系统发生永久性故障,分别制定系统的故障恢复计划。方式1,故障支路为支路7-8,故障时间为18:00—19:00;方式2,故障支路为支路25-26,故障时间为12:00—13:00;方式3,故障支路为支路3-4,故障时间为14:00—16:00。

6.2 故障恢复结果分析

基于本文所建立的模型,能够得到在方式1下系统制定的故障恢复方案为断开支路8-9、10-11、16-17,合上支路8-14、21-11、32-17,此时失电负荷节点为节点9、10,系统未出现孤岛。

实际上,当故障发生在支路7-8时,能源互联配电网合上联络支路21-11,从而通过该支路对节点11及后续节点供电。系统合上联络支路8-14从而通过节点14的转供对节点8供电,节点14由于含有储能并网,因此使得支路8-14相比于支路9-8更加方便进行功率支援。系统断开了负荷等级较低的节点9的供电支路10-9以及支路8-9,这一方面是由于支路传输容量的限制,同时也是为了避免出现环路以满足系统的辐射状拓扑约束。在失去支路7-8这一条主要的供电支路之后,联络支路21-11的传输容量以及节点14中接入的储能功率调节量有限,因此节点17的负荷通过联络支路32-17的运行进行转供,同时为避免系统环网运行断开了支路16-17。在故障方式1下,系统没有出现孤岛运行的情况,仅发生了节点9失负荷的情况。

另外还能够得到在方式2下系统制定的故障恢复方案为断开支路27-28、28-29,合上支路17-32,此时失电负荷节点为节点28,系统出现孤岛为节点26、27。

通过分析可以得到当支路25-26发生故障时,25-32链状支路仅能通过支路17-32供电,故障情况较为严重。在一般情况下,如果出现功率紧张的情况,系统将通过最末端的负荷节点26进行负荷中断,然而由于负荷节点26为一级负荷,如果发生中断将造成严重后果,这体现在故障恢复模型中对目标函数的影响较大;同时节点26包含光伏发电并网,如果对节点26进行负荷中断将进一步造成功率紧张。但由于发生故障之后系统功率不足,所以通过断开支路27-28和支路28-29的方式对节点28进行负荷中断。在这种情况下形成了孤岛包括节点26、27,孤岛内通过光伏发电和FC出力形成岛内功率平衡。另一方面,系统还通过多能互补协调的方式增加对电能网络的支援,缓解了功率紧张。在方式2下,仅发生1个负荷节点失电。

事实上,在方式2下能源互联配电网在故障恢复期间,系统不仅通过制定新的开关状态尽可能满足供电要求,同时还通过调节能源互联配电网的优化运行计划降低失电负荷量,故障期间系统优化运行计划调整如表1所示。

从表1中可以看出,在发生故障之前,由于外网分时电价处于峰时段,因此储能处于充分放电状态,同时FC和CCHP型MT有着较大的出力。在故障发生之后,由于故障支路对配电网链路6-17的影响较大,因此位于节点14的储能充分放电,其放电功率

表1 方式2下从体博弈者制定的系统优化运行计划调整

Table 1 Adjustment of optimal operation plan of system made by subordinate game player under Mode 2

调整对象	故障前 / kW	故障后 / kW
CCHP型MT出力	55.36	76.74
FC出力	83.74	85.38
电储能充放电功率	91.19	120
甲烷式电转气功率	0	0
电动汽车充电桩负荷	34.76	18.97

从原来的91.19 kW上升到120 kW,处于最大放电功率状态;同时CCHP型MT的出力略有增加,主要是为了给转供后的节点17的负荷提供支撑;为了降低联络支路21-11的转供压力,位于节点6的电动汽车充电桩降低了充电负荷,但是由于外网分时电价处于峰时段的原因,系统原本制定的充电功率较低,所以故障发生之后所降低的充电负荷有限。而对于FC,由于对链路6-17的支援程度有限,因此其出力基本不变。

根据方式1下和方式2下故障的恢复结果对比可以看出,尽管能源互联配电网运行在多能互补协调机制下,然而电能网络与热能网络以及气能网络的连接设备主要集中在链状支路25-32上。因此在方式1的故障下,多能互补协调对功率紧张的节点调节程度有限。而在方式2的故障下,由于故障支路本身发生在链状支路25-32上,故障所导致的链状支路25-32各个负荷节点供电紧张情况能够更加方便地由多能互补协调设备进行支援,因此方式2相比于方式1尽管故障发生支路对整个系统中的影响更大,但采用故障恢复方案后所造成的不良影响却反而小得多。

发生方式3下的故障时,系统制定的故障恢复方案如下:断开支路8-9、10-11、15-16、16-17、27-28、28-29、3-4,合上支路21-11、20-7、24-25、17-32,失电负荷节点为节点3、9、10、16、28,节点17、29-32形成孤岛。

可以看出,由于故障发生在距离上级电网距离较近的支路2-3上,故障对系统的不利影响也较大,故障恢复策略较复杂。此时,在满足系统辐射状约束的前提下,能源互联配电网充分利用了联络支路增强对末端负荷节点的供电能力。在严重功率不足的情况下,系统通过合上联络支路20-7、21-11、24-25和32-17增强网络结构,为了防止出现环网,并没有进一步合上联络支路8-11。在链路3-17中,系统对重要程度较低的节点负荷3、9、10、16进行失电,从而降低影响。在链路25-32中,系统形成了包括节点17、29-32在内的孤岛,并对节点28进行失电。在方式3的故障下,系统改变开关状态的数量较多,失电负荷节点也更多。方式3下在故障恢复期间系

统调整后的优化运行计划如表2所示。

表2 方式3下从体博弈者制定的系统优化运行计划调整

Table 2 Adjustment of optimal operation plan of system made by subordinate game player in Mode 3

调整对象	数值/kW	
	故障前	故障后
CCHP型MT出力	0	130
FC出力	43.52	120
电储能充放电功率	36.63	120
甲烷式电转气功率	75.47	0
电动汽车充电桩负荷	96.64	27.67

从表2中可以看出,由于方式3的故障较为严重,影响范围广,因此在发生故障之后,无论是MT、FC还是储能设备,其出力均达到限值。甲烷式反应机组将电转气过程取消,而电动汽车充电桩的充电负荷也通过有序调整策略降到了最低程度。

为了考察多能互补协调运行下的能源互联配电网对系统故障恢复指标的影响,针对同样的配电基本网络,但不计及FC进行气转电、CCHP型MT进行气转电和气转热以及甲烷式反应机组、电转气和交通子网络的接入,在同样的3种故障方式下运行故障恢复模型,可以得到在能源互联配电网形式以及传统主动配电网形式下的系统故障恢复指标对比如表3所示,表中综合运行成本包括对失电负荷的中断补偿费用。

表3 3种方式下故障恢复指标对比

Table 3 Comparison of fault restoration indexes under three modes

方式	配电网	失电负荷量/kW	开关操作次数	故障期间综合运行成本/元
1	传统主动配电网	232.18	6	2695.14
	本文能源互联配电网	204.48	6	2436.57
2	传统主动配电网	232.18	4	2969.44
	本文能源互联配电网	116.09	3	2669.63
3	传统主动配电网	928.72	14	4726.03
	本文能源互联配电网	580.47	11	4375.74

从表3中可以看出,相比于传统主动配电网,能源互联配电网在相同的故障方式下,其失电负荷量更小,故障期间综合运行成本更低,无论是在系统运行经济性上还是供电可靠性上均更优。

为了验证基于主从博弈理论的能源互联配电网故障恢复方案的有效性,以故障方式3为例,分别采用文献[8]中的方法(方法1)和文献[9]中的方法(方法2)以及本文方法对同一情形下的能源互联配电网制定故障恢复方案,得到模型求解指标对比如表4所示。

从表4中可以看出,相比于方法1和方法2,本文所提的故障恢复方法具有更好的寻优性能、更短的求解时间和迭代次数以及更稳定的求解性能。

表4 不同故障恢复方法下模型运行指标对比

Table 4 Comparison of model operation indexes under different fault recovery methods

故障恢复方法	失电负荷量/kW	求解时间/s	迭代次数	目标函数标准差/kW
1	589.52	14.66	107	13.84
2	586.76	11.76	92	11.09
本文方法	580.47	8.74	63	6.41

7 结论

针对能源互联配电网的故障恢复问题,本文计及开关状态集和系统优化运行计划调整作为不同地位的决策变量,基于主从博弈模型提出能源互联配电网故障恢复方法。所提方法同时计及了系统开关状态集的制定以及多能互补协调优化运行方案的调整对故障恢复方案的支撑,能够适用于能源互联配电网故障恢复方案的制定,保证了故障方案的最优。仿真算例表明,相比于传统配电网,能源互联配电网在制定故障恢复方案时,能够进一步减少失电负荷量和综合运行成本,这不仅提升了系统运行的经济性,也提高了系统运行可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave MacMillan, 2011: 46-48.
- [3] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.
- [4] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [5] 王增平,姚玉海,郭昆亚,等. 基于等级偏好序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报,2015,30(20):185-192.
WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [6] 陈昕玥,唐巍,陈禹,等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术,2014,38(1):99-106.
CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System

- Technology, 2014, 38(1):99-106.
- [7] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5):251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [8] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17):45-49.
ZHAO Jingjing, YANG Xiu, FU Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17):45-49.
- [9] 刘宗歧, 石道桂, 陈启, 等. 基于节点状态优化的配电网故障恢复混合整数线性规划方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 53-57.
LIU Zongqi, SHI Daogui, CHEN Qi, et al. MILP approach based on node status optimization for distribution network restoration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 53-57.
- [10] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12):50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [11] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10):61-65, 81.
WANG Shouxiang, LI Xiaojing, XIAO Chaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10):61-65, 81.
- [12] IRVING M R, LUAN W P, DANIEL J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6):447-457.
- [13] 巩伟峰, 房鑫炎. 基于混合编码方式的配电网故障恢复算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6):105-108.
GONG Weizheng, FANG Xinyan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6):105-108.
- [14] SHIN D J, KIM J O, KIM T K. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-tabu algorithm [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2):145-152.
- [15] 赵强, 敬东, 李正. 蚁群算法在配电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2):52-54.
ZHAO Qiang, JING Dong, LI Zheng. Application of ant colony algorithm for distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2):52-54.
- [16] 杨丽君, 刘建超, 曹良晶, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6):85-89.
- [17] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5009-5017.
- [18] 魏鞅, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术, 2015, 39(4):939-945.
WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area[J]. Power System Technology, 2015, 39(4):939-945.
- [19] 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1):19-23.
DIAO Qinhu, LIN Jikeng, NI Yixin, et al. Game theory and its allocations in power markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1):19-23.
- [20] 董军, 张晓虎, 李春雪, 等. 自动需求响应背景下考虑用户满意度的分时电价最优制定策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 67-73.
DONG Jun, ZHANG Xiaohu, LI Chunxue, et al. Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):67-73.
- [21] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1):134-140.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):134-140.
- [22] 万蓉, 薛蕙. 考虑PMU的配电网潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):33-37.
WAN Rong, XUE Hui. Power-flow calculation for distribution network with PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):33-37.
- [23] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶, 等. 考虑有限理性的电力系统连锁故障多阶段动态博弈防御模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 69-74.
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing, et al. Defence model based on multistage dynamic game with consideration bounded rationality against power system cascading failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):69-74.
- [24] 李鹏, 李涛, 张双乐, 等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微电网系统的微电源组合优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12):33-38.
LI Peng, LI Tao, ZHANG Shuangle, et al. Combinatorial optimization of micro-sources in standalone microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):33-38.

作者简介:



马天祥

马天祥(1986—),男,辽宁朝阳人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为配电系统运行与控制、主动配电网关键技术(E-mail: matianxiang1986@126.com);

贾伯岩(1978—),男,河北石家庄人,高级工程师,硕士,主要研究方向为输配电系统运行分析与管理、输配电线路关键技术;

卢志刚(1963—),男,河北邯郸人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统经济运行分析与控制。

(编辑 李玮)

Multi-energy complement and coordinated post-contingency recovery method of distribution energy networks based on master-slave game theory

MA Tianxiang¹, JIA Boyan¹, LU Zhigang², CHENG Xiao³, WANG Daiyuan⁴

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Key Laboratory of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Hebei Electricity Transmission & Transformation Facilities Company, Shijiazhuang 050051, China;

4. Shijiazhuang Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To solve the post-contingency recovery problem of distribution energy networks, a master-slave game theory-based approach is developed. The post-contingency recovery method of distribution energy networks considers multi-energy complementary and coordination. The strategy of the master problem is to adjust the post-contingency switch state of distribution network, which aims at minimizing the electricity shedding after the recovery of distribution energy networks. The operation strategies of subenergy networks including electricity, heat, natural gas, and transportation sub energy networks are adjusted in the slave problem. This problem minimizes the post-contingency total operation cost of multi-energy networks, and the necessary operational constraints of each sub energy network are considered. Hence, the master player adjusts the post-contingency switch state, while the slave player adjusts the operation strategy of distribution energy networks. Simulative results show that the distribution energy network provides more economic and reliable post-contingency operations in comparison with the traditional distribution network.

Key words: distribution energy networks; post-contingency recovery; master-slave game theory; multi-energy complementary and coordination; demand shedding index

(上接第7页 continued from page 7)

Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic

WU Feng, DAI Xiaomei

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The generalized load model for distribution network considering new energy sources such as photovoltaic is usually formed by paralleling the traditional composite load model with the equivalent model of new energy sources, which makes the model have huge structure and high model order, and parameters difficult to identify. An integrated equivalent modeling method for generalized load of distribution network considering photovoltaic is proposed, which simplifies the model structure and does not depend on the output data of photovoltaic generation system. Based on the theory and simulation analysis of dynamic characteristics of photovoltaic generation system, the polynomial equivalent model of photovoltaic generation system is proposed. The integrated model of photovoltaic generation system and static load of distribution network is established, the value ranges of parameters are extended, and the improved genetic algorithm is adopted to identify the model parameters. The simulative results based on the combined simulation platform of DIgSILENT and MATLAB show that the proposed model can accurately describe the dynamic characteristics of the generalized load of distribution network considering photovoltaic generation system.

Key words: photovoltaic generation system; distribution network; integrated modeling; polynomial model; dynamic characteristic; load modeling; combined simulation

附 录

系统中各个节点所接入设备的情况如表 A1 所示，能源互联配电网中电能子网络的负荷等级情况如表 A2 所示。

表 A1 能源互联配电网电能子网络中设备接入情况

Table A1 Equipment access in power subnetwork in distribution energy internetwork

分布式发电种类	并网节点	单个节点并网容量/kW
光伏发电	5, 26	100
风力发电	4, 15	80
CCHP 微燃机	31	130
燃料电池	26	120
电储能	14	120
甲烷式电转气	29	60
电动汽车充电桩	6	140

表 A2 能源互联配电网节点负荷等级

Table A2 Importance classification of node load in distribution energy internetwork

负荷重要程度	负荷节点集合	权重系数
一级负荷	1, 2, 5, 7, 8, 13, 14, 22, 26	1
二级负荷	4, 6, 9, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 27	0.5
三级负荷	3, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 28, 29, 30, 31, 32	0.1