

DOI: 10.7667/PSPC160488

基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化

郭腾云, 刘艳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 智能配电网的发展要求在配电网重构中充分考虑分布式电源出力的不确定性, 减小失电带来的影响, 保证配电网供电的可靠性和经济性。在此背景下, 把分布式电源出力不确定性虚化为“大自然”的博弈策略, 与调度者的拓扑优化策略先后对策, 构建了以重构费用最小为目标的配电网重构序贯行动博弈模型。然后通过改进的博弈树方法对重构的博弈模型进行求解, 得到考虑了分布式电源出力不确定性的配电网重构方案。最后通过对 IEEE 33 节点配电系统的仿真分析, 验证了所提出方法的有效性, 并从经济性和可靠性方面对重构方案进行了鲁棒性分析。

关键词: 配电网重构; 博弈论; 鲁棒性; 不确定性

Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations

GUO Tengyun, LIU Yan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: With the development of smart distribution network, the influence of DG output uncertainty should be fully considered in distribution network reconfiguration, so that the impact of loss of power can be reduced, moreover the reliability and the economy of distribution can be ensured. Under this background, a distribution network reconfiguration model based on the game theory is built in this paper, in which the network topology and DG output are considered as game participants and the reconstruction cost is treated as an objective. Then, through giving an improved game tree method, the reconfiguration model is solved. Finally the effectiveness of the proposed method is validated by simulation for IEEE 33 distribution system, and robustness of reconstruction scheme is analyzed from economy and reliability respectively.

Key words: distribution network reconfiguration; game theory; robustness; uncertainty

0 引言

对配电网进行重构, 合理地对待失电区域进行供电恢复, 保证供电可靠性, 是配电自动化的重要任务。由于环境恶化以及化石资源的大量消耗, 分布式发电技术得到迅速发展, 并且逐渐形成规模。随着配电网中分布式电源渗透率的逐步提高, 在配电网重构中必须考虑分布式电源出力不确定带来的影响。

配电网重构以失电量最小和操作费用最小为目标, 通过对分段开关和联络开关的操作寻求最优的网络拓扑结构。传统的配电网重构可以通过支路交换法、操作待切割树等方法解决^[1-2]。但是当配电网中含有分布式电源时, 上述方法不再适用。所以有学者提出了一些有针对性的启发式算法来处理含分布式电源的重构问题, 例如优先通过联络线转移负荷^[3], 虽然将分布式电源在重构问题中加以考虑, 但是却仅仅当作一个数值为负的负荷来处理, 没有

考虑其出力的不确定性^[4-5]。随着分布式电源规模的扩大, 一些基于概率和可信度理论的方法被用来处理重构中分布式电源出力不确定性的问题^[6-9]。这类方法通过抽样把不确定性问题转换为确定性问题进行求解, 但是需要大量的历史数据作为支撑来确定分布式电源出力的概率分布。满足预期可信度的重构方案仍有可能出现违背约束条件的情况, 方案求解的有效性有待提高。文献[10]引入区间数以描述分布式电源出力的不确定性, 提出了基于区间潮流分析的含分布式电源配电网的故障恢复快速算法。然而, 采用启发式算法进行负荷转移操作, 具体操作受到故障所处位置的联络线备用容量限制, 无法寻求全局最优负荷转移方案。同时, 区间潮流分析也增加了算法的复杂性。可以看出, 现有配电网重构方法对分布式电源出力变化的适应性以及求解方法的便捷性均有待提高。

本文针对上述问题, 采用满足鲁棒性的双方博

弈策略来解决考虑分布式电源出力不确定性的配电网重构问题。在将分布式电源出力的不确定性虚化为“大自然”控制的博弈手段的基础上,建立了由决策者与大自然构成的两参与者序贯行动博弈模型,其博弈手段分别为网络拓扑优化以及分布式电源出力的不确定性。最终通过改进博弈树方法求解所建博弈模型的纳什均衡解,得到考虑分布式电源出力不确定性的配电网重构方案。

1 配电网重构中序贯博弈行为的分析

博弈论通过对多方对弈行为的模拟,得到体现多方利益的解决方案,已在电力市场、电力系统经济调度等领域得到应用^[11]。

博弈模型可以表述为 $\min_x \max_y f(x, y)$, x 和 y 代表博弈双方。在博弈中,变量 y 会使目标函数增大,而变量 x 会使目标函数减小,最终将达到博弈均衡,亦称为纳什均衡,即:任何一方通过单独改变自己的策略都不会使得自己的收益增加。序贯行动博弈是博弈论中一种特殊的情况,指在博弈行为中,参与人的行动有着严格的先后顺序并轮流选择行动的一类互动博弈。博弈策略得到的结果具有良好的鲁棒性,即在任意可能的冲击下,都能够保证方案的实际支出控制在支付函数以内,保证了方案的适用性和经济性。

为了对包含因随机事件引发的不确定性的博弈问题建模,博弈论引入了一个被称为“大自然”的外部参与者^[12]。就含分布式电源的配电网重构问题而言,“大自然”所控制的就是波动的分布式电源出力。分布式电源出力的波动,会给配电网重构带来两方面的影响。一方面,当分布式电源出力的波动在可控范围之内,可通过就地消纳方式满足负荷的需求减小网络损耗,并对电压起到一定的支撑作用。在这种情况下,减小了重构的难度,利于重构;另一方面,如果分布式电源出力的波动幅度过大,可能违背系统运行的安全约束,甚至形成二次失电,将给重构带来更大的挑战^[13]。因此,从减小甚至杜绝最终重构方案可能出现的违背运行约束情况的发生,应当充分考虑分布式电源出力波动带来的不利影响,即:“大自然”总试图最大化恢复成本,劣化重构效果。从电网调度者的角度来看,则需要通过重构或优化网络拓扑,在满足电网运行安全约束的前提下,最大限度地减小因设备开断和分布式电源出力波动引起的失电量,即:考虑因分布式电源出力波动导致的最恶劣重构场景,最小化其恢复成本。

显然,“大自然”和电网调度者已针对配电网重构问题构成了双方相互对弈的格局。就一个对弈回

合来看,“大自然”将针对相对固定的电网拓扑结构不断调整分布式电源出力的波动水平,增大配电网的失电水平,最大化重构成本。其后,电网调度者将以“大自然”所给出的最恶劣重构场景为基础,通过优化网络拓扑,最小化重构成本,由此形成一个博弈回合中两者顺序行动的格局,反之亦然。综上,可通过构建由“大自然”和电网调度者参与的序贯行动博弈模型,对考虑分布式电源出力不确定性的配电网重构问题进行求解。

2 基于序贯行动博弈的配电网重构模型

通过分析,考虑分布式电源出力不确定性的配电网重构问题被处理为双参与者的序贯博弈问题^[14-17]。一个参与者为电网调度人员,参与手段为优化配电网拓扑结构(X),目标是为了使电网运行的可靠性和经济性更好;另一方为大自然,参与手段为波动的分布式电源出力(P_{DG}),为了使电网的可靠性和经济性下降。

配电网重构的目标是:以尽可能少的开关操作优化网络拓扑结构,使失负荷量最小。因此,配电网重构博弈模型的支付函数应由失电费用、开关操作费用、分布式电源购电费用、网络损耗费用和分布式电源弃电惩罚费用构成。其中,失电费用和开关操作费用仅由网络拓扑结构决定,与分布式电源的出力无关;分布式电源购电费用由分布式电源出力决定,与网络拓扑结构无关;配电网网络损耗费用和分布式电源弃电惩罚费用是由网络拓扑结构和分布式电源共同决定的。改变网络拓扑结构,会改变潮流分布和系统对分布式电源的消纳能力,从而对费用产生影响。分布式电源出力的变化,会改变并网容量和潮流分布,二者共同决定了配电网网络损耗费用和弃电惩罚费用。各项费用具体分析如下。

第一,失电费用。失电费用由失电负荷量 f_1 和失电成本 C_1 得到。失电负荷量可以通过对重构后的拓扑网络进行分析得到,如式(1)所示。

$$f_1(X) = \sum_{m \in E_1} L_m \quad (1)$$

式中: L_m 为第 m 台设备的失负荷量; E_1 为带电节点集合; $m \notin E_1$ 表示失电设备。

第二,开关操作费用。开关操作费用由开关操作次数 f_2 和开关操作成本 C_2 得到。开关操作次数由变换前后的网络拓扑差异决定,如式(2)所示。

$$f_2(X - X_0) = |x_1 - x_{1,0}| + |x_2 - x_{2,0}| + \dots + |x_M - x_{M,0}| \quad (2)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ 为变换后的网络拓扑,且满足辐射状约束; X_0 为网络的初始状态; M 为网络

的线路总数； x_i 为线路 i 的开断状态，为 1 时表示线路投运，为 0 时表示线路退出。

第三，分布式电源购电费用。分布式电源购电费用由电源出力 f_3 和单位购电成本 C_3 得到。

$$f_3 = P_{DG} \quad (3)$$

式中， P_{DG} 为 t 时刻分布式电源的出力。

第四，配电网网络损耗费用。配电网的网络损耗会产生额外的费用，增加系统的重构成本。配电网网络损耗费用由损耗负荷量 f_4 和售电电价 C_4 得到，如式(4)所示。

$$f_4(X, P_{DG}) = Lost \quad (4)$$

第五，弃电惩罚费用。在故障重构过程中，从经济性和安全性方面考虑，不能保证所有分布式电源出力都全部并网，但是在国家鼓励清洁能源发展的背景下，应当鼓励更多的分布式电源出力并网，所以对弃电现象实施惩罚。惩罚费用由弃电功率 f_5 和弃电惩罚成本 C_5 共同决定，如式(5)所示。

$$f_5(X, P_{DG}) = P_{DG} - P'_{DG} \quad (5)$$

式中， P'_{DG} 为分布式电源的实际并网容量。

综上所述，考虑分布式电源出力不确定性的配电网重构问题可以通过以下量化表达式求得。

目标函数如式(6)所示。

$$\begin{cases} \min_X \max_{DG} F = \min_X \max_{DG} F(X, P_{DG}) \\ F = C_1 f_1 + C_2 f_2 + C_3 f_3 + C_4 f_4 + C_5 f_5 \end{cases} \quad (6)$$

式中， F 为博弈的支出函数。

模型的约束条件如下。

1) 配电网辐射状约束

配电网重构前后都不允许出现环网，否则使得故障定位和保护装置整定发生错误。

$$X \in g \quad (7)$$

式中： X 为重构后配电网的拓扑结构； g 为辐射状拓扑结构集合。

2) 电网安全约束

当配电网拓扑结构发生变化后，必须对其进行安全校验，包括节点电压约束和线路潮流约束。

$$\begin{cases} U_{i\min} < U_i < U_{i\max} \\ S_j < S_{j\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： U_i ， $U_{i\max}$ ， $U_{i\min}$ 分别为节点 i 的电压值和电压的上、下限； S_j 为线路 j 的实际潮流； $S_{j\max}$ 为线路 j 允许通过的最大潮流。

3 基于序贯博弈的配电网重构模型求解

本文选用博弈树方法求解重构的博弈模型，其中以节点深度编码技术求解最优网络拓扑结构 X ；通

过在出力区间内遍历求取使得支付函数最大的分布式电源出力 P 。

3.1 网络拓扑寻优策略

拓扑寻优是在网络拓扑中有线路退出运行后，进行失电节点的恢复工作。通过网络拓扑寻优策略以使得失电量最小、恢复成本最小，而两者之间又以对失电负荷的恢复相对于恢复成本有绝对优先级。

配电网重构中应当充分考虑配电网的辐射状约束条件，避免不可行解的产生，可以通过改进编码规则加以处理^[18]。基于节点深度编码技术(DNE)的拓扑寻优方法，通过对网络进行节点的深度优先编码，在此基础上选择根节点，通过开关操作整体转移根节点及下游节点到新的根节点上，得到新的网络拓扑，在转移过程中保证了原带电区域和被转移区域的辐射状结构不变，得到的新的拓扑结构同样具有辐射状的特点。通过选择不同的根节点以及不同的下游节点，进而产生不同的下一代个体，可以形成以节点深度编码技术为基础的拓扑结构优化方法，最终得到给定分布式电源出力情况下的最优网络拓扑。NDE 技术在进行配电网重构时最大的优势在于能够保证生成的拓扑一定为可行解，满足配电网辐射状约束。因此应用 NDE 技术不必要进行频繁的网络拓扑分析和辐射状校验环节，大大减小了算法寻优时间^[19-20]。

3.2 分布式电源出力策略

从虚拟化的博弈参与者“大自然”的角度来说，通过在分布式电源的可能出力区间内选择分布式电源的实际出力，破坏原有系统的运行稳定性，增加系统的经济支出。但是其可供选择的范围始终是有限的，通过预测出力和预测精度的选择，能够有效地表示分布式电源的出力不确定性。构建分布式电源出力不确定性的区间出力模型^[10]如式(9)所示。

$$P_{DG} \in [a, b] = [\alpha, 2 - \alpha] \times P \quad \alpha \in (0, 1) \quad (9)$$

式中： P_{DG} 表示分布式电源的实际出力； P 表示出力的预测值； $a = \alpha \times P$ 表示可能的最小出力； $b = (2 - \alpha) \times P$ 表示可能的最大出力； α 表示预测精度，取值在 0 到 1 之间，其数值越接近 1 表示预测精度越高，实际出力为区间内任意值。

3.3 模型求解

博弈树是一种基于几何技术展示、分析以及求解序贯行动博弈的方法。博弈树通过给出博弈行为中各参与者的身份信息、策略信息以及最终的支付函数，清晰地展示博弈过程，引导参与者做出对自己最有利的策略。对博弈树进行拓展，方法如下：博弈双方轮流对策，各方都执行完一次对策，定义为一个博弈回合，循环进行多回合博弈，直到求得

序贯博弈的纳什均衡解为止, 即: 在某一回合博弈中, 任意一方单方面更改自己的策略, 都不会使得自己的收益增加时结束算法。由于数学上已经证明了纳什均衡解是必然存在的, 所以经过有限回合博弈, 总能够找到博弈模型的解。上述的循环、多回合博弈树方法把求解变为了控制变量法的思路, 即: 在某个博弈策略给出时, 已经知道其他博弈者最近的一次策略, 这样就消除了博弈中策略顺序带来的不公平性, 更加方便博弈模型的求解。

结合配电网重构问题, 具体说明博弈树求解方法如下。

步骤一: 读取分布式电源出力预测值 P 和网络的初始状态。定义在给定出力下使得支付函数最小的网络结构为最优网络拓扑 X_f ; 在给定网络拓扑下, 使得支付函数最大的出力为最劣分布式电源出力 P_f , 初始化, 令 $P_f = P$ 。

步骤二: 在保持 P_f 不变的情况下, 仅改变拓扑结构。根据 NDE 方法得到在出力为 P_f 下的最优网络拓扑。更新最优网络拓扑 X_f , 并计算最小恢复成本 $K1$ 。

步骤三: 在保持 X_f 不变的情况下, 仅改变分布式电源出力, 得到 X_f 对应下的最劣出力, 同时更新 P_f , 计算最大恢复成本 $K2$ 。

步骤四: 当 $K1$ 不等于 $K2$ 时, 转至步骤二进行下一回合博弈过程; 当 $K1$ 等于 $K2$ 时, 以 X_f 为恢复方案, $K1$ 为恢复成本, 结束博弈, 输出重构方案。

在步骤二与步骤三中, 博弈双方分别进行对策一次, 构成了一个博弈回合。做出决策时, 都已知对方的策略, 在保持对方策略不变的情况下, 寻找自己的最优策略, 从而双方博弈过程变化为了两阶段的控制变量优化过程。 $K1$ 等于 $K2$ 表示博弈达到均衡状态, 结束算法。

4 算例分析

本文以 IEEE33 节点配电系统^[21]为例对所建模型进行验证。系统结构如图 1 所示, 其中不失一般性地选择节点 13 接入一台风机代表分布式电源。恢复时长定为 10 h, 并设定开关操作成本为 10(百元/次), 失电成本为 50(百元/MW·h), 电网售电费用为 15(MW·h), 分布式电源购电费用为 12(百元/MW·h), 弃电惩罚成本为 12(百元/MW·h)。首先, 针对预设故障, 分别研究计及和不计及风电出力不确定性的重构方案, 以验证博弈方法对配电网重构的有效性。其次, 对方案在随机风电出力情况下进

行仿真, 以验证博弈方案的鲁棒性。最后研究了风电出力预测精度对重构成本的影响。

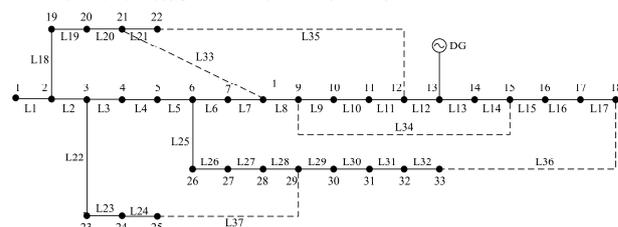


图 1 IEEE 33 节点配电系统

Fig. 1 Distribution system of IEEE 33

4.1 风电出力不确定性对重构方案的影响

为验证基于博弈论配电网重构方法的可行性, 有选择地开断某些线路, 分别针对风电出力确定和变化两种情况进行仿真, 得到对应的方案 I 和方案 II, 比较相应的重构策略和重构成本。其中, 预测风功率 $P=0.5$ MVA, 预测精度 $a=0.7$, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 两种情况下重构方案比较

Table 1 Recovery programs comparison between two methods

开断 线路	确定风功率情况		不确定风功率情况	
	重构方案 I	重构成本/ 百元	重构方案 II	重构成本/ 百元
9	闭合 36 断开 14	100.0165	闭合 35	127.2105
14	闭合 34	108.2581	闭合 33, 34 断开 7	130.2379
20	闭合 33	116.7185	闭合 33, 34 断开 9, 14	137.4936
27	闭合 36, 37 断开 30	137.4239	闭合 35, 36, 37 断开 9, 30	162.4710
4, 8	闭合 33, 35, 36, 37 断开 28, 30	153.2440	闭合 33, 35, 36, 37 断开 26, 30	186.7280
20, 30	闭合 33, 34, 36 断开 12, 31	220.1965	闭合 34, 36 断开 9, 14	334.3183
7, 15	闭合 33, 35 断开 9, 21	200.4458	闭合 33, 35 断开 9, 21	238.1029
15, 20, 29	闭合 35, 37 断开 11, 24	497.9267	闭合 34, 35 断开 8, 11	543.0801

通过表 1 的结果可以发现, 基于博弈方法的重构成本要大于确定风功率情况下方案的重构成本。这是因为确定风功率的恢复成本理论上是给定线路退出运行后重构的最小成本。而基于博弈的重构方案考虑了出力的各种可能性, 具有更强的适应性。

4.2 重构方案的鲁棒性分析

为了进一步验证本文方法的鲁棒性, 针对 4.1 节中在确定风功率下得到的方案 I 和本文方法得到

的方案 II 进行仿真。重构方案的鲁棒性是指方案对波动的风机出力具有更强的适应性，在波动情况下总的恢复成本更低。在变化的风机出力下进行仿真过程如下：

首先生成随机的风机出力样本集，根据给定的预测精度，在得到的出力区间内，随机生成 1000 个具体的风机出力数据，从而给出了数量为 1000 个的随机风机出力集，以供仿真使用。

然后分别针对随机出力集内的工况求取各方案的重构成本，如果出现违背约束条件的情况发生，则进行二次重构。最后，统计每个方案的重构成本之和以及违背约束情况发生的次数。

以断开线路 L9 为例进行说明。首先在(0.35 MVA, 0.65 MVA)的区间内生成数量为 1000 个的随机出力集。然后在重构方案 I 下，改变风机出力，求得 1000 次仿真的重构总成本为 101 000 百元，出现违背约束而进行二次重构的次数为 63，占比为 0.063；然后在重构方案 II 下，改变风机出力，求得 1000 次仿真的重构总成本为 93 848 百元，没有出现违背约束而进行二次重构的情况，说明基于博弈方法得到的方案有更强的鲁棒性。以同样的方法选取其他支路进行仿真，得到的结果如表 2 所示。

表 2 两种方案的鲁棒性对比

Table 2 Robust comparison of the two programs

线路	重构成本及违背约束频率	
	方案 I/百元	方案 II/百元
L4	163 490, 0.151	132 690, 0
L9	101 000, 0.063	93 848, 0
L9, L23	513 930, 0.334	358 370, 0
L7, L15	201 520, 0.092	184 290, 0
L15, L20, L29	498 930, 0.216	404 640, 0
随机线路	235 270, 0.104	213 110, 0

从表 2 的数据中可以看出，考虑风电出力不确定性后，方案 I 会出现破坏运行约束条件的情况而增加重构的费用。方案 II 由于考虑了各种出力，具有更好的适应性，没有出现破坏运行约束条件的情况，所以具有良好的鲁棒性。

以上仿真均在主观给定的条件下进行，更一般地，对随机开断线路的情况进行仿真。随机开断线路更加客观地反映了系统可能面临的工况，得到的结果可以更好地验证本文方法的鲁棒性。具体过程如下：

首先生成一个数量为 10 个的随机开断线路集和数量为 100 个的随机风机出力样本集。然后保持 4.1 节给定的条件下，对随机开断线路集内的具体开断线路进行仿真。最后汇总在不确定出力集下的恢

复成本之和。得到的仿真结果见表 2。可见基于博弈方法的重构方案在随机故障下依然取得了更理想的恢复效果，具有更强的鲁棒性。

4.3 风机出力预测精度对故障恢复的影响

1) 确定开断线路下预测精度对重构成本的影响

给定开断线路、预测出力 $P=0.5$ MVA 和风机随机出力集的条件下，通过改变预测精度 a 进行仿真，统计各开断线路总的恢复成本，结果如表 3 所示。

表 3 预测精度对恢复成本的影响

Table 3 Effect of prediction accuracy on recovery costs

a	重构成本/百元				
	L9	L14	L10, L28	L11, L26	L14, L20, L28
0.5	109 740	114 790	140 790	147 710	469 360
0.6	104 230	111 670	136 020	142 850	241 750
0.7	98 850	108 640	131 080	138 200	288 940
0.8	93 526	106 150	126 660	133 360	225 440
0.9	88 486	103 730	125 280	129 600	178 790

表 3 的数据显示，随着预测精度的提高，恢复成本逐渐降低。

进一步地，在风机预测精度 $a=0.5$ 到 $a=1$ 之间等间距选择 100 个数值来表征风机预测的不同精度，在每个出力区间内随机产生数量为 1000 个的出力样本集，求取 1000 次的重构总成本，绘制对应的曲线如图 2 所示。

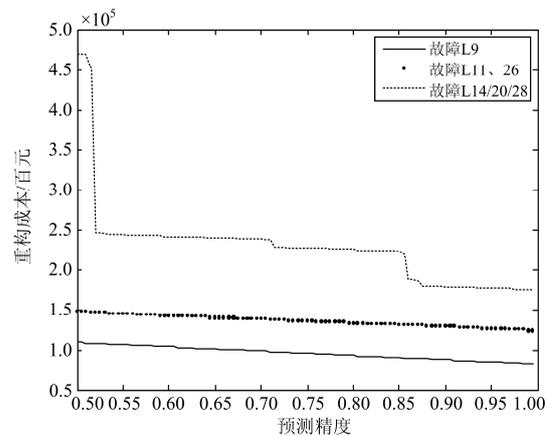


图 2 预测精度对恢复成本的影响

Fig. 2 Effect of prediction accuracy on recovery costs

从图 2 可以看出，预设故障越严重，其重构成本越高。同时，随着预测精度的提高，重构成本逐渐降低，并且对于严重故障而言会出现大幅度阶梯状下降的情况，表明提高预测精度对于减小大故障重构成本的效果更加明显，提高预测精度可以削弱不确定性的影响。

2) 随机线路下预测精度对重构成本的影响

实际中线路的开断有一定的随机性, 所以对随机线路退出运行的情况进行仿真可以得到更加贴近实际的结果。具体步骤如下:

首先生成一个数量为 10 个的随机开断线路集和数量为 100 个的随机风机出力样本集。然后在给定 $P=0.5$ MVA 的条件下, 改变预测精度, 使其从 $\alpha=0.5$ 以步长为 0.05 变化到 $\alpha=0.95$ 。最后统计在每个预测精度下, 10×100 个工况总的恢复成本。得到的结果如图 3 所示。

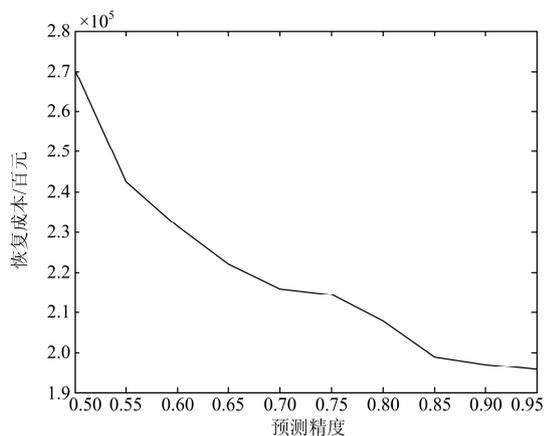


图 3 预测精度对随机重构成本的影响

Fig. 3 Effect of prediction accuracy on stochastic reconstruction costs

从图 3 中可以看出, 预测精度对重构成本有着重要的影响, 对于较高的预测精度, 重构的成本会更低, 随着预测精度的提高, 重构的成本越来越接近确定风功率情况下的恢复成本, 也就是最低重构成本。因此, 提高风机出力的预测精度, 对于配电网重构的可靠性和经济性都有重大意义。

5 结语

本文以重构成本最小为目标, 通过选择网络拓扑和分布式电源出力作为参与者, 构建了配电网重构的序贯行动博弈模型。该方法的主要特点如下:

1) 通过引入“大自然”作为博弈参与者, 能够在重构中充分考虑分布式电源出力波动带来的影响, 处理考虑不确定性的重构问题。

2) 本文方法需要的分布式电源出力不确定性模型相对简单, 是一个区间值, 不必要通过大量的数理统计得到分布式电源出力的数学分布, 极大地提高了模型使用的方便性。

3) 通过本文方法得到的重构方案具有鲁棒性。本文方法得到的方案, 最小化了系统可能的最大恢复成本, 杜绝了极端恶劣工况的发生, 保证了恢复

过程中系统的可靠性。

需要指出的是, 本文采用博弈方法处理了配电网的单时段重构问题, 进一步可以用以处理地区电网多时段重构问题, 对本文的方法进行拓展应用。

参考文献

- [1] 刘文军. 考虑约束条件预处理的配电网重构技术[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 64-68.
LIU Wenjun. Distribution network reconfiguration based on preprocessing of constraint conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 64-68.
- [2] 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.
- [3] 黄弦超, 张粒子, 张晶伟. 含分布式发电的配电网检修负荷转移方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 32-35.
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, ZHANG Jingwei. A load transfer scheme for distribution maintenance with distributed generation taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 32-35.
- [4] 卢扬, 吴俊勇, 郝亮亮. 基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 62-68.
LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 62-68.
- [5] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [6] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 157-163.
XU Xufeng, HUANG Minxiang, WANG Tingting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 157-163.
- [7] 李飞, 徐弢, 林济铿, 等. 计及分布式电源出力及负荷不确定性的配电网孤岛划分[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 62-68.

- 2015, 39(14): 105-113.
- LI Fei, XU Tao, LIN Jikeng, et al. Island partition of distribution network considering uncertainty of distributed generators and loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 105-113.
- [8] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96.
- HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [9] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 57-62.
- LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 57-62.
- [10] 李志铿, 王钢, 陈志刚, 等. 基于区间潮流的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 53-58.
- LI Zhikeng, WANG Gang, CHEN Zhigang, et al. An interval load flow based algorithm for service restoration in distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 53-58.
- [11] 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.
- [12] 阿维纳什, 苏珊. 博弈策略[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [13] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 346-351.
- SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [14] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 47-56.
- MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 47-56.
- [15] 魏韡, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(一)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 37-43.
- WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economical scheduling methodology for power systems part one theoretical foundations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37-43.
- [16] 梅生伟, 魏韡. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(11): 1331-1344.
- MEI Shengwei, WEI Wei. Hierarchical game and its applications in the smart grid[J]. J Sys Sci & Math Scis, 2014, 34(11): 1331-1344.
- [17] 王传涛, 蔡晓菲, 武泽艳. 考虑存在欺骗行为的二级物流服务供应链决策博弈研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 565-571.
- WANG Chuantao, CAI Xiaofei, WU Zeyan. Research on the two-echelon logistics service supply chain decision game considering the existence of deception[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 565-571.
- [18] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.
- CHEN Chun, WANG Feng, LIU Pei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [19] 黄弦超, GARETH, TAYLOR. 基于节点深度编码技术的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 40-44.
- HUANG Xianchao, GARETH, TAYLOR. Service restoration of distribution networks based on node-depth encoding technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 40-44.
- [20] DELBEM A C B, CARVALHO A D, POLICASTRO C A, et al. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design[M] // Genetic and Evolutionary Computation-GECCO 2004. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 678-687.
- [21] WU Y K, LEE C Y, LIU L C, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1678-1685.

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-06-02

作者简介:

郭腾云(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为配电系统可靠性与配电网检修决策优化; E-mail: gty1990@yeah.net

刘艳(1973-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制, 智能技术在电力系统中的应用。

(编辑 魏小丽)