

计及设备风险的供电恢复在线决策方法

朱 斌, 蒋 宇, 吴 奕, 朱海兵, 王 鹏

(江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘 要:2013 年江苏电网年度用电量首度超越广东跃居全国第一。随着社会用电负荷持续增长, 电网结构日益复杂, 并呈现出网格状和多环网结构, 故障后快速选择电网恢复路径, 实现精益化的恢复供电变得日益困难。从工程实际角度出发, 提出了计及设备风险的故障后恢复供电在线决策方法, 以解决调度工作中遇到的实际问题。最后通过实际的故障案例验证了该方法的正确性和有效性。

关键词:设备风险; 供电恢复; 在线决策; 粒子群优化算法; 自愈控制

中图分类号:TM711

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)03-0046-03

江苏电网经过多年城市电网的运营, 伴随着城市负荷的高速增长, 复杂城市供电运行方式的弱点日益显现, 主要包括: 在负荷高峰、线路重载情况下, 遇环网中重要受电通道故障, 会造成大量潮流的转移, 从而引起关联线路的严重过载, 对电网安全运行极为不利^[1,2]; 在电网实际方式安排中, 广泛存在枢纽变电所母线结排, 采用同侧母线(如 I、II 母或 III、IV 母)经双回线路并供同对侧的情况, 如遇双母线同时失电, 则会完全损失输电通道, 双环网解环为双 C 型网, 供电可靠性严重下降; 由于新能源发电大量接入城市电网, 电源固有的不确定性, 迅速向城市电网扩散, 导致供电可靠性迅速下降^[3,4]。这些都给故障后的电网快速恢复带来了困难, 如何迅速高效的找到最适合的恢复供电路径成为难题。文中提出一种计及设备风险的供电恢复在线决策方法, 通过多维度风险评估, 辅助调度员在线最优决策, 实现故障后小系统快速安全恢复并网。该方法基于历史故障经验和合理的经验推理, 构建严重故障集, 运用统计决策理论结合设备状态评价和静态安全性分析快速形成最优调度方案。由于历史经验集和粒子群优化算法的应用, 有针对性地解决了将预警目标从单故障风险延拓到群发性相继故障风险时带来的维数灾问题。该方法在江苏电网的应用, 将极大增强城市电网故障后小系统的快速恢复并网能力, 提高城市电网安全稳定运行水平。

1 基于决策理论的风险优化调度

决策理论最早由 Wald 于 1947 年提出, 其目标是要从决策空间 D 中, 以损失函数 F 最小为优化目标, 进而挑选出最优的恢复控制决策 d 。

$$F = \int_{x \in d} W[\mu, x] dx \quad (1)$$

$$W[\mu, x] = \mu(x)L(s(x)) \quad (2)$$

式中: $\mu(x)$ 为对应于恢复策略 d 每一个操作元件 x 发生故障的概率; μ 值通过在江苏范围内的历史观察统计得到; $W[\mu, x]$ 是定义在整个决策空间 D 上的非负系数函数, 其中 $s(x)$ 是拟操作设备 x 对应的风险集合, $L(x)$ 为风险集 s 对应的负荷损失。

1.1 生成恢复控制策略空间

根据电网拓扑结构, 利用智能算法自动生成恢复控制策略空间 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 其中任一恢复策略为 $d_i = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, x 代表恢复路径中所需要操作的设备。在图 1 所示系统中, 假设故障为线路 12 永久性故障且开关拒动, 则线路 3、6、12 和 II 母将失电。恢复送电策略为隔离线路 12, 用分段开关 c 试送电 II 母, 合上开关 3、6 恢复线路 3 和 6 送电, 合环母联开关 b ; 则恢复策略 $d = \{c, \text{Line}_3, \text{Line}_6, b\}$ 。

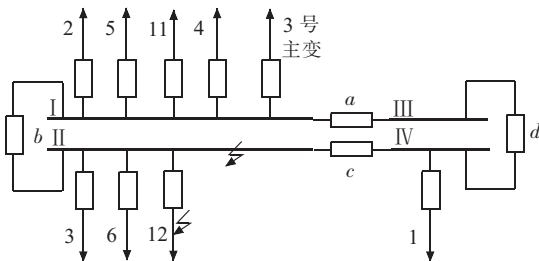


图 1 变电站 A 运行方式

1.2 构造损失函数

根据实时电网运行方式, 采用网络拓扑外推一层的分析技术, 在线通过推导风险集的方式, 计算出单一恢复策略 d_i 所对应的风险值; 进而通过决策理论, 优化搜索出具有最小运行风险的恢复供电方案。

在文中, 设备 x 对应的风险集 $s(x)$ 是指发生故障时, 停电设备 x 外推一层所包含的所有设备的集合; 且对应的风险数值 L 为风险集包含设备损失负荷的总加。在图 1 所示故障中, 以变电站 A 操作分段开关 c 充电 II 段母线为例, 其对应的风险集元件包括 I 母故障, II 母故障 (再次故障), IV 母故障, 3 号、6 号线路故障

(不含故障线路 12), 其风险集合 $s(c)$ 采用符号标记为:

$$s(c) = \{\text{Bus_I}, \text{Bus_II}, \text{Bus_IV}, \text{Line_3}, \text{Line_6}\} \quad (3)$$

对应的风险值为:

$$L(s(c)) = L(\text{Bus_I}) + L(\text{Bus_II}) + L(\text{Bus_IV}) + L(\text{Line_3}) + L(\text{Line_6}) \quad (4)$$

根据式(1—4), 对应于图 1 所示线路 12 永久性故障且开关拒动的故障, 恢复送电策略 $d = \{c, \text{Line_3}, \text{Line_6}, b\}$ 对应的损失函数 F_d 表述为:

$$F_d = \int_{x \in d} W[\mu, x] dx = \sum_{x \in d} W[\mu, x] = \sum_{x \in d} \mu(x) L(s(x)) = \mu(c) L(s(c)) + \mu(x_{\text{Line_3}}) L(s(x_{\text{Line_3}})) + \mu(x_{\text{Line_6}}) L(s(x_{\text{Line_6}})) + \mu(x_b) L(s(x_b)) \quad (5)$$

式中: $\mu(c)$ 为充电母线 II 母的历史故障概率统计。

同时为满足实际电网调度工作需求, 文中引入了线路和主变的功率作为硬约束条件。约束条件为:

$$P_{\text{Line}_i} \leq P_{\text{Line}_i}^{\max}, i \in N \quad (6)$$

$$P_{T_j} \leq P_{T_j}^{\max}, j \in N \quad (7)$$

式中: P_{Line_i} 线路 i 的实时有功传输功率, P_{T_j} 为主变 j 的实时有功功率; $P_{\text{Line}_i}^{\max}$, $P_{T_j}^{\max}$ 为其相应的功率限值。

2 基于优化算法的恢复策略

以往在对预想故障集进行静态安全分析和在线安全稳定分析时, 会遇到组合的维数灾问题, 程序自动生成的预想故障集只能到 $N-1$, 而不能扩展到 $N-2$ 及其以上。文中在求解基于风险集的最优解过程中, 充分考虑了计算复杂度问题, 选用粒子群优化求解算法, 其有效性在工程实践中已得到验证。

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练、组合优化、模式识别、电力系统优化等领域, 具有原理简单、容易实现、易于与其他算法融合等特点^[5,6]。PSO 算法基于群体行为, 根据对环境的适应度将群体中的个体移动到较优的区域, 将每个个体看作是 D 维搜索空间中的一个没有体积的微粒, 在搜索空间中以一定的速度飞行, 这个速度根据其本身的飞行经验和同伴的飞行经验来动态调整。第 i 个微粒表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 它经历过的最好位置记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, 也称为 p_{best} 。在群体所有微粒经历过的最好位置的索引号用符号 g 表示, 即 P_g , 也称为 g_{best} 。微粒 i 的速度用 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 表示。对每一代, 其第 d 维($1 \leq d \leq D$)描述方程^[5]如下:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + c_2 \text{Rand}() (p_{gd} - x_{id}) \quad (8)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (9)$$

$$V_i < V_{\max} \quad (10)$$

其中: w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为加速常数; $\text{rand}()$ 和 $\text{Rand}()$ 为 2 个在 $[0, 1]$ 范围里变化的随机值。微粒的速度 V_i 被一个最大速度 V_{\max} 所限制。如果当前对微粒的加速导致它的速度 v_{id} 超过该维的最大速度 $v_{\max, d}$, 则该维的速度被限制为该维最大速度 $v_{\max, d}$ 。

2.2 恢复策略计算流程

文中所提电网故障后快速恢复策略计算方法主要包括以下几个功能模块: 生成恢复控制策略空间、功率约束检验、风险集生成并计算风险值、基于决策理论的优化计算。其总体计算流程如图 2 所示。

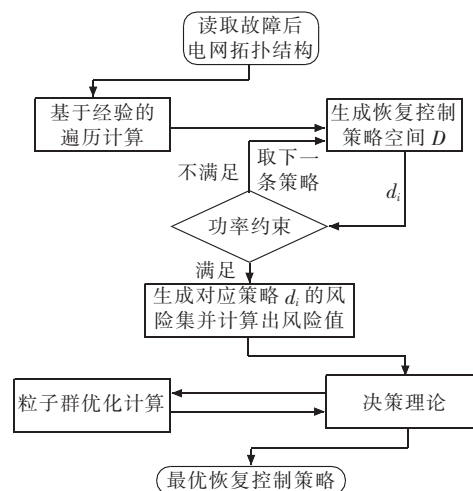


图2 恢复并网策略计算流程

3 算例分析

3.1 案例描述

变电站 A 近区的电网接线方式如下图 3 所示, ABCDF 等变电站间由单回或双回线相连形成多角环供电; A 站站内母线的结排方式如图 1 所示。A 站事故前 I 段母线压变为冷备用状态(缺陷停运), 因此 I 段母线与 II 段母线压变发令操作至二次并列运行状态。

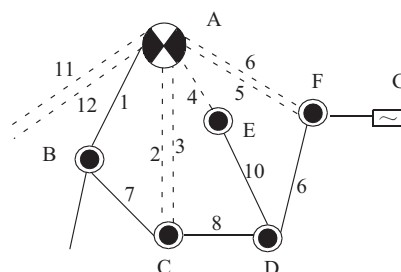


图3 地区电网接线方式

运行在 II 母的线路 12 的 A 相电流互感器故障(属于 II 段母线区内故障), I、II 段母差动作跳开 II 母上所有开关(线路 3、6、12, I、II 段母联 b, II、IV 分段 c 开关), II 段母线失压; 由于 I、II 母压变并供, I 段母线所有线路保护也失压, 运行在 I 段母线上 4

条线路2、5、11、4的距离保护因失压而动作跳闸; I段母线和3号主变仍带电运行(3号主变开关, I、III段分段a开关运行); 线路7、8电流严重超过额定载流量。

3.2 在线决策流程

(1) 实际处理过程。

(a) 从监控和数据采集系统(SCADA)发现线路7、8电流严重超过额定载流量, 分别高达1430 A和1180 A(线路载流量均为660 A/40℃), 过载倍数分别达到了2.1、1.8倍; 调度员立即通知相应下级调度在上述变电所事故拉电, 同时通知通过上述变电所并网的低压相关小电厂满发, 发令合上线路5开关。合环后线路5电流上升至1174 A(425 MW)线路7、8电流均下降到线路额定载流量之内, 事故得到了有效的控制。

(b) A所值班员检查发现母线故障系因线路12的A相电流互感器发生爆炸所致; 调度员随后将A所II段母线与其他可恢复线路送电合环。

(2) 通过程序自动运行仿真计算, 最优恢复控制策略为:

- (a) A站线路12开关改为冷备用(隔离故障点);
- (b) A站线路5开关合闸(控制潮流, 合环);
- (c) A站线路4开关合闸(恢复送电);
- (d) A站线路11开关合闸(恢复送电);
- (e) A站线路2开关合闸(恢复送电);
- (f) A站线路3开关合闸;
- (g) C站线路3开关合闸(充电母线);
- (h) A站母联b开关合闸(合环);
- (i) A站分段c开关合闸(合环);
- (j) A站线路6开关合闸(充电线路);
- (k) F站线路6开关合闸(合环)。

根据事故实际处理过程分析, 可以得出结论: 文中提出的计及设备风险的故障后小系统并网在线决策方法的仿真计算结果, 与调度实际处理过程基本一致, 验证了该算法的正确性和有效性。

4 结束语

随着电力系统的快速发展、电网结构的日趋复杂

以及典型设计在电网中的大规模应用, 某些特殊运行方式在电网运行中大量出现。同时, 在复杂的故障情况下, 保护、自动化等系统信号量非常大, 这对调度员的事事故判断与事故处理能力提出了更高的要求。文中提出了一种基于电网恢复策略推理和设备风险集生成技术的故障后电网快速恢复技术, 能够在线识别电网中潜在的严重故障模式, 从而避免电网恢复过程中再次发生严重故障, 并能达到快速、安全恢复送电的目的。通过构造损失函数, 可以有效计算出不同恢复策略下的风险, 进而辨识出最有效的恢复策略。该方法实现了设备风险集辨识与电网静态安全分析相结合, 从而有效解决了在电网恢复过程中群发性相继故障风险的辨识问题, 极大提高了电网安全稳定运行水平, 增强了大电网在恢复过程中的在线风险防控能力。

参考文献:

- [1] 周志超, 张 焰, 王 伟, 等. 变电站供电可靠性的定量评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 8(9): 66-69.
- [2] 姚李孝, 崔杜武, 伍 利, 等. 基于时序模拟法和Petri网的电气主接线可靠性评估[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(1): 42-46.
- [3] 王世洋, 左 靖. 母线保护双重化改造中注意事项的探讨[J]. 继电器, 2008, 36(3): 75-78.
- [4] 马 龙, 谈 森, 刘豫龙. 唠山站A段母差保护跳闸原因分析及防范措施[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 86-88.
- [5] 杨龔亮. 改进粒子群算法的无功优化[J]. 黑龙江电力, 2011(1): 33-36.
- [6] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.

作者简介:

- 朱 斌(1965), 男, 江苏镇江人, 高级工程师, 从事调度运行管理工作;
- 蒋 宇(1980), 男, 四川自贡人, 高级工程师, 从事电力调度运行管理工作;
- 吴 奕(1968), 男, 重庆人, 高级工程师, 从事调度监控运行管理工作;
- 朱海兵(1978), 男, 江苏张家港人, 高级工程师, 从事调度监控运行管理工作;
- 王 鹏(1987), 男, 吉林吉林人, 硕士, 从事调度运行管理工作。

Online-decision Method of Power Supply Restoration Considering Equipment Risk

ZHU Bin, JIANG Yu, WU Yi, ZHU Haibing, WANG Peng

(Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Electricity consumption in the Jiangsu power grid in 2013 exceeded the amount of the Guangdong power grid and ranked the first over the whole country. With the increasing growth of power load and the complexity of the power grid, it is more important and difficult to choose the supply restoration path rapidly and realize elaborate supply restoration. Targeting at practical power system operation, an online-decision method of power supply restoration considering equipment risk is proposed in this paper, so as to provide technical support to the dispatch operation in the Jiangsu power grid. The effectiveness and correctness of the method are verified by the analysis on a real fault case that happened in the Jiangsu power grid.

Key words: equipment risk; supply restoration; online decision; particle swarm optimization; self-healing control