

基于EMS的地区电网供电恢复 在线决策系统的开发与应用

在地区电网供电恢复决策系统的开发与应用过程中,研究了电网局部停电故障下的供电恢复策略自动生成技术,提出了实用算法。首先通过拓扑分析生成可用恢复路径;然后基于优化模型打开环网并基于线路潮流灵敏度消除过载;最后根据潮流校验结果确定停电区域最佳的供电方式,并根据停电区域的重要性排序生成供电恢复的操作序列。该决策系统已在某特大地区电网中得以应用,具有良好的实用性。

江 伟¹ 陶文伟² 黄颖祺¹ 张宗包¹ 郝 蛟¹/1.深圳供电局有限公司
2.中国南方电网有限责任公司



江 伟/高级工程师

现代电力系统规模越来越庞大,系统结构和运行方式日益复杂,这就从客观上决定了各类事故、尤其是各种难以预料的偶然因素所导致的大停电事故是无法完全避免的。因此,一旦电力系统发生事故,如何采取有效的措施尽可能地缩小停电范围、缩短停电时间,防止事故的扩大和蔓延,及早恢复供电,就成为一个和预防电力系统事故同样重要的问题^[1-2]。

供电恢复决策本质上属于带有约束条件的开关组合搜索和优化问题,问题的规模随着网络的增大而增加,在形成最终辐射状供电网络时,又成为一个潮流优化问题。针对地区电网和配电网进行供电恢复的研究已有很多,包括模糊理论^[3-4]、遗传算法^[5]、Petri网方法^[6-9]和专家系统^[10-12]等,理论研究偏多,与在线应用和实用化存在一定差距。

本文提出一种适用于地区电网110 kV及以下电压等级电网的实用供电恢复决策系统。该系统除了考虑现有供电恢复

算法的要求,包括110 kV网络辐射状供电结构、最少开关操作次数等,还按照优先级给出操作序列和负荷调整方案;采用了直流潮流的灵敏度信息,提高了运算速度,满足应急处置中对计算速度的要求,具有很好的实用性;根据实际需要可以给出具体的操作序列,指导性强。

系统功能框架及模块组成

实用化的地区电网供电恢复决策系统有以下要求。

- 1) 完全基于EMS系统,不需要单独进行数据维护,系统内的网络模型、实时数据和事故信号等均来自EMS系统。
- 2) 保证恢复以后的电网为辐射状运行,系统能检测出搜索恢复过程可能产生的环网,并给出最优的解环策略。
- 3) 根据停电区域的重要性,给出恢复操作序列。
- 4) 对出现过载的恢复策略,根据负荷优先级进行负荷调整。
- 5) 对故障后以及供电恢复后电网情况给出一个可视化表达,方便调度运行人员理解分析事故情况和进行恢复供电操作。

1. 系统功能框架设计

所提出的供电恢复决策系统主要由离线分析和在线决策两大部分功能模块组成。系统从EMS系统中获取网络模型和实时数据,通过进行故障模拟或捕捉事故信号启动系统分析计算,最终给出恢复操作序列以及模拟恢复后的潮流分布。系统总体框架如图1所示。

关键词/Keywords

地区电网·
供电恢复·
在线决策·
能量管理系统·

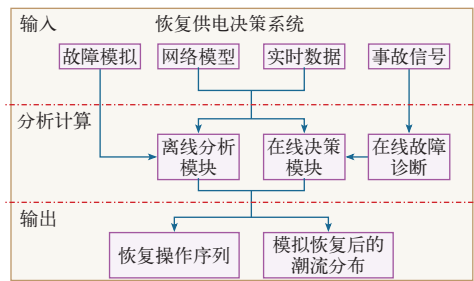


图1 供电恢复决策系统总体框架

2. 离线分析模块

离线分析模块可以在电网实时状态和研究状态下进行故障模拟分析，通过设定线路故障、母线和变压器等故障类型，并通过模拟保护动作和自动装置动作情况得到电网事故后运行状态。

然后系统启动计算模块，通过搜索供电恢复区域，并判断电网环路，生成恢复操作序列。如果出现过载的恢复策略，则根据负荷优先级进行负荷调整，并把恢复操作序列动作后电网状态通过拓扑着色表示。该模块可作为事故预案的生成工具。

3. 在线决策模块

在线决策模块实时监测厂站上送的事故总信号，通过比较事故前后的电网断面数据进行快速的停电区域诊断，再将诊断结果提交到决策系统的计算模块，恢复策略的计算过程与离线分析一致。

算法实现

事故发生后系统生成恢复供电决策的算法流程如图2所示。

1. 环路生成算法

环路生成的目的是在已知网络拓扑和故障设备的基础上，快速形成可对停电区域恢复供电的所有环路，为“解环方案择优”环节提供输入。

如果把全网节点都加入环路分析，会引入很多无关环路，扩大问题的求解规模。由于恢复操作应在停电区域内部以及停电区域与外部电源间的边界节点之间进行，所以环路分析只需在停电区域以及边界节点组成的区域内进行，定义该区域为“恢复相关区域”。

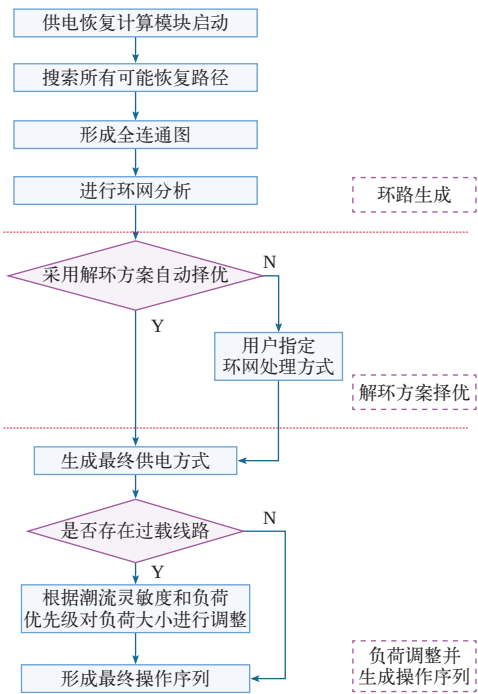


图2 决策算法流程

进一步地，如果边界节点之间通过外部区域具有电气连接，则在边界节点之间加入等效线路，用于描述节点间的连接关系，从而使得对全连通图的环路分析局限于恢复相关区域内。

下面通过一个例子来简述环路生成算法的流程。假定电网停电以后，通过搜索所有可用恢复供电路径并形成全连通图以后的状态如图3所示，其中灰色区域圆形为停电厂站，白色圆形为带电边界节点，两者共同组成恢复相关区域。

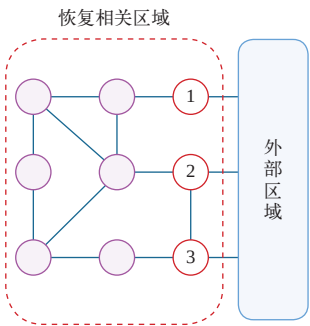


图3 停电后系统状态

断开边界节点与停电区域之间的线路以及边界节点之间的线路，然后结合边界节点与外部区域进行拓扑分析，即在处于同一拓扑岛的节点之

间加入等效线路。加入等效线以后的网络如图4所示。

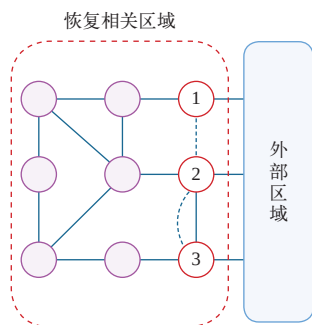


图4 加入等效线路后系统状态

在图4中，对添加等效线路以后的恢复相关区域按照以下方法进行环路分析：首先形成图的支撑树，然后依次添加一个连枝（如将恢复相关区域内的备用联络线投入），可得所有的基本回路。依次对基本回路进行组合，即可得到恢复供电的环路方案集。

2. 解环方案择优

对110 kV及以下电压等级电网，恢复后电网运行方式应呈辐射状，这要求解开上文中形成的环路。解环时可断开环上的任意一条支路，所以解环方案一般不止一种，需要对所有解环方案进行评估，选择最优的解环方案。

解环的基本原则是不造成线路过载，若至少有一种解环方案不造成线路过载，此时解环方案的选取原则是确保各线路上的功率最均衡。采用以下评估方法，即

$$\min \sum \left(\frac{I_i}{I_i^{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} B_k X \geq 1 \\ |X| = m \end{cases}$$

式中， I_i 为线路 i 上的电流； X 是0-1变量，表示图上各边的开合状态， $X_i=1$ 表示第 i 条支路打开； B 为回路——支路关联矩阵； m 为基本回路数。 $B_k X \geq 1$ 保证所有基本回路都有边打开， $|X|=m$ 表示打开边数等于基本回路数，由此保证所有的回路都打开。

若所有解环方案都出现线路过载，此时解环方案选取原则为使切除负荷的影响最小化，采用

以下评估方法，即

$$\min \sum_i w_i \Delta P_{Di}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_i S_{ij} \Delta P_{Di} \geq \Delta P_{Lj} \\ 0 \leq \Delta P_{Di} \leq P_{Di} \\ B_k X \geq 1 \\ |X| = m \end{cases} \quad (2)$$

式中， w_i 为切除负荷 i 的代价； ΔP_{Di} 为负荷 i 的调节量； S_{ij} 为切除负荷 i 的有功对线路 j 的有功灵敏度； ΔP_{Lj} 为线路 L 的过载量。约束中后两式意义与上式相同。

在计算每个方案的潮流结果时，如果采用全潮流计算，则会发现大规模计算时计算速度很慢，无法在线应用。本文从全连通状态出发，采用基于稀疏矢量技术的补偿法潮流进行线路开断计算，评估各种解环方案下的结果，可以得到非常高的计算效率。

3. 根据负荷重要性计算可恢复的负荷量

若在恢复过程中存在部分线路过载，则需要依据停电前的负荷状况，结合负荷对线路的灵敏度和负荷的重要性等信息，计算负荷调整量作为可恢复的负荷水平。其优化求解模型为

$$\min \sum_i w_i \Delta P_{Di}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_i S_{ij} \Delta P_{Di} \geq \Delta P_{Lj} \\ 0 \leq \Delta P_{Di} \leq P_{Di} - P_{Di}^{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中， P_{Di} 和 $P_{Di}^{\min}$ 分别为负荷 i 的当前值和最小保留值，若负荷 i 可以全部切除，则 $P_{Di}^{\min}=0$ ， $i=1, 2, \dots, N$ ； ΔP_{Di} 为负荷 i 的调节量， $i=1, 2, \dots, N$ ； w_i 为切除负荷 i 的代价， $i=1, 2, \dots, N$ ，代价越大表示该负荷重要性越高，在实际应用中，切除负荷 i 的代价 w_i 一般参照地区电网用户负荷重要等级确定，可按特级、一级、二级和普通负荷的分级依次设定为1、0.6、0.3和0.1； ΔP_{Lj} 为过载线路 j 的过载量， $j=1, 2, \dots, M$ ； S_{ij} 为切除负荷 i 时有功对线路 j 有功的灵敏度因子。

4. 形成最终操作序列

恢复供电的操作序列总体原则是：先合上可对停电区域恢复供电的所有开关，形成多环网，

再按照解环方案择优结果进行解环,如该方案将造成潮流过载,则最后进行负荷调整操作。

由解环方案择优的结果得到的是恢复后最终的供电方式,根据该方式按照停电区域的优先级生成操作序列。首先可以设定停电区域的优先级顺序,根据该优先级顺序选择首先恢复的停电区域;然后计算停电区域到各个电源点之间的距离,定义该距离为停电区域到电源点间所经过路径的电压等级和需操作开关次数的加权和,其表达式为

$$d = \sum_l (\alpha V_l + \beta n_{cb}^l) \quad (4)$$

式中, V_l 为线路 l 的电压等级; n_{cb}^l 为线路 l 上需要动作的开关次数; α 随电压等级的升高而减小; β 随电压等级的升高而增大。

选择距离最短的电源点对停电厂站进行连接,并根据最终恢复方案对其他电源点进行连接,连接过程中如果出现环网则进行解环处理,如出现过载则进行负荷调整。

算例分析

图5为某地区局部电网,象山变电站、廷苑变电站和平安变电站为220 kV变电站,其余为110 kV变电站。平安变电站220 kV母线故障,母线差动保护动作,220 kV母线上全部线路开关跳闸(红

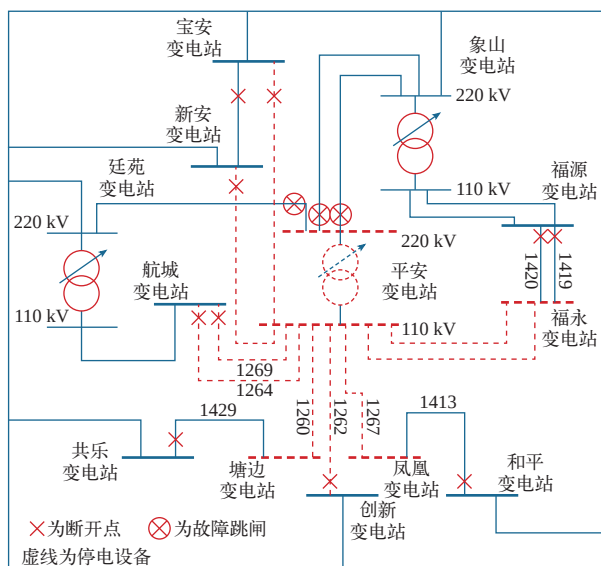


图5 局部电网停电后状态

色部分),造成平安变电站、福永变电站、凤凰变电站和塘边变电站全站失压(虚线厂站为停电状态)。

(1) 添加等值支路

对图5进行环路分析,在边界厂站之间添加等值线路(红色虚线,表示边界厂站之间在外部区域有电气联系),如图6所示。

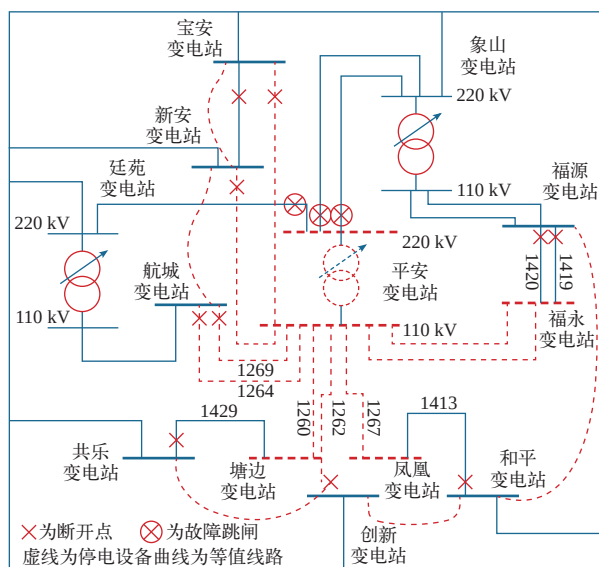


图6 添加等值线路后局部电网状态

(2) 添加连支形成基本回路

依次合上添加边界厂站与失压厂站之间的备用线路开关(不包括故障跳开的支路),即添加连枝,得到环路分析结果,共5个一般环路。

环路1:平安变电站-创新变电站-和平变电站-凤凰变电站;环路2:平安变电站-创新变电站-共乐变电站-塘边变电站;环路3:平安变电站-宝安变电站-新安变电站;环路4:平安变电站-航城变电站-新安变电站;环路5:平安变电站-凤凰变电站-和平变电站-福源变电站-福永变电站。

(3) 解环择优分析

对环路1:合上凤和线1443,断开平凤线1267;对环路2:合上边乐线1429,断开平边线1260;对环路3:经解环择优分析不做处理;对环路4:合上平城I线1264、平城II线1269;对环路5:合上福源I线1419、福源II线1420。

经过解环分析和方案择优，本案例的解环方案不会造成恢复后潮流过载，因此不需要进行负荷切除，全部负荷均可恢复。按照使恢复后潮流分布最均衡的解环方案择优原则，形成的最终恢复操作序列如下表所示，其中步骤1～步骤4为环路生成，步骤5、步骤6为解环。

表 操作序列

步骤	恢复操作	动作开关
1	投入线路：风和线1413	合上和平安变电站风和线1413开关
2	投入线路：边乐线1429	合上塘边变电站边乐线1429开关
3	投入线路：平城Ⅰ线1264以及平城Ⅱ线1269	合上航城变电站平城Ⅰ线1264开关、航城变电站平城Ⅱ线1269开关
4	投入线路：福源Ⅰ、福源Ⅱ线1419、1420	合上福源变电站福源Ⅰ、福源Ⅱ线1419开关、1420开关
5	退出线路：平风线1267	切开平安变电站平风线1267开关、凤凰变电站平风线1267开关
6	退出线路：平边线1260	切开平安变电站平边线1260开关、塘边变电站平边线1260开关

恢复后电网除平安变电站220 kV母线外，所有变电站的用电负荷都已恢复供电。

结束语

针对地区电网的特点，建立了电网供电恢复决策系统。通过生成可用恢复路径、基于优化模型解开环网、基于线路潮流灵敏度消除过载和生成供电恢复的操作序列等步骤为调度员提供了供电恢复辅助决策。同时，所提出的供电恢复决策系统既可以与故障诊断功能进行联动，提供实时故障的供电恢复决策，又可以进行离线预案分析，灵活生成各种预想停电的恢复方案，在调度运行中取得了良好的实际应用效果。

参考文献

[1] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传. 三维协调的新一代电网能量管理系统 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (13): 1-6.

[2] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 等. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (15): 1-6.

[3] Huang Chaoming. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (2): 867-874.

[4] Chen Wenhui, Tsai Menshen, Kuo Hsilin. Distribution system restoration using the hybrid fuzzy-grey method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1): 199-205.

[5] Hsiao Yingtung, Chien Chingyang. Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (4): 1394-1400.

[6] Fountas, Hatziaargyriou, Valavanis. Hierarchical time-extended Petri nets as a generic tool for power system restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1997, 12 (2): 837-843.

[7] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法 [J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 23-28.

[8] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri网的电网故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (34): 42-49.

[9] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合智能式的故障恢复专家系统 [J]. 电力系统自动化, 2000, 25 (2): 17-22.

[10] 杨成峰, 乐秀璠. 配电网故障恢复专家系统的一种实现 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (11): 28-31.

[11] Tsai Menshen. Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (1): 219-225.

[12] 刘明慧, 张东英, 邹品元, 等. 能在线应用的地区电网故障恢复系统 [J]. 电网技术, 2006, 30 (18): 35-39.

(收稿日期: 2014-06-11) EA