

基于最短电气距离的运行方式组合方法

李运坤¹, 吕飞鹏¹, 蒋科², 陈新¹, 胡亚平¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 根据复杂网络理论, 将大型电力系统用带权网络模型来描述, 基于此模型下的节点最短电气距离提出了一种运行方式组合方法。该方法利用节点最短电气距离表征节点间电气联系强弱的特点, 给出了故障电流计算和分支系数计算的最短电气距离判据, 据此找到系统内对故障电流和分支系数影响大于某一阈值的厂站, 将其纳入进行方式组合, 以达到优化运行方式组合的目的。

关键词: 继电保护; 整定计算; 方式组合; 电气距离; 复杂网络

Method for power system operation mode combination based on shortest electrical distance

LI Yun-kun¹, Lü Fei-peng¹, JIANG Ke², CHEN Xin¹, HU Ya-ping¹

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610021, China)

Abstract: Based on the complex network theory, the large-scale power system is described by the weighted network model. According to shortest electrical distance of nodes which belongs to this model, a method for operation mode combination is presented. The method makes use of the feature that shortest electrical distance of nodes represents the degree of their electrical association to find criterions for calculating fault current and branch parameters. And hereby the operation model of substations or plants with great impact on the setting values of relays will be considered, so finally achieve the purpose of optimizing the operation mode combination.

Key words: relay protection; setting calculation; operation mode combination; electrical distance; complex network

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0024-04

0 引言

目前继电保护装置基本都是采用离线整定的方式确定定值, 整定计算时须考虑系统的最不利运行条件, 进行运行方式的组合以保证保护在极端条件下不会误动作, 传统整定计算中一般只考虑保护所在线路对侧或者背侧母线所属厂站的轮断组合来求取定值^[1]。在电力系统规模越来越大, 系统接线趋于复杂的情况下, 传统的整定方法难以满足整定计算的需求, 有必要考虑将更大范围内的系统元件纳入方式组合的范畴。

为了考虑厂站方式变化对保护定值的影响, 文献[2]采用了电源搜索级别的办法, 通过电源级别来表征电源对整定线路供电的可能性, 该方法较为繁琐, 实用性不强。文献[3]提出了厂站灵敏度系数的概念, 并以此作为判据来判定需要参与方式组合的系统电源。此方法利用电网节点阻抗矩阵, 降低了计算的复杂性, 但由于其在判据中用故障节点的注

入电流来近似代替流经故障支路的电流, 降低了判据的准确度。文献[4]采用耦合系数来判定需要参与系统方式组合的支路, 但是没有考虑厂站的方式变化对定值的影响。

本文根据复杂网络理论^[5-9], 将大型电力系统用带权网络模型来描述, 并运用最短电气距离分析了厂站方式变化对故障电流和配合系数的影响, 将影响大的厂站纳入进行方式组合。通过实际算例验证了本文方法的正确性和有效性。

1 带权电力网络和最短电气距离

1.1 带权电力网络

电力系统是一个典型的复杂网络, 它由节点和节点间的边组成, 其中节点表示系统的元素, 边表示元素之间的相互作用。如果将复杂网络的每条边都赋予相应的权值, 该网络就成为有权网络。有权网络可以描述节点之间存在的联系的强弱, 比较完整地表达复杂网络的结构^[5]。根据电力网络的实际

特点, 如果以线路的阻抗参数 X_l 作为相应边 l 的权值, 并作如下假设:

1) 将发电机、变电站、负荷视为网络的节点, 输电线和变压器视为网络的边。

2) 将系统中同杆并架的双回(或多回)输电线路合并, 视为一条边, 此边的权值定义为等值过后的线路电抗值。

那么一个节点个数为 n , 边的条数为 m 的电力网有权网络数学模型便可以用图 G 及边权连接矩阵 W_G 描述如下:

$$G = (N, L); \quad (1)$$

$$W_G = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: N 为电网所有发电机、变电站和负荷节点的集合, $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$; L 为一组有权边的集合, $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 。

边权邻接矩阵 W_G 的矩阵元 W_{Gij} 为:

$$W_{Gij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ X_{ij} & i \neq j, \text{且} \{ni, nj\} \text{为图} G \text{的边} \\ \infty & i \neq j, \text{且} \{ni, nj\} \text{非图} G \text{的边} \end{cases}$$

式中: X_{ij} 为节点 i 与节点 j 间边的电抗值。

1.2 节点间的最短电气距离

在带权图 G 中, 若 P 是从节点 u 到节点 v 之间的所有路径中距离最短的一条路径, 则称 P 为从 u 到 v 的最短路径, 此路径经过的所有弧的权值之和 L 称为从 u 到 v 的最短距离^[9]。

有权电力网络任意两节点 i, j 间所有路径中沿线权值之和最小的那条路径 L 称为从 i 至 j 的最短路径, 此路径的权值之和 $L(i, j)$ 称为节点 i, j 间的最短电气距离^[7]。

电气距离的大小在一定程度上表征了电力网络不同节点间电气联系的强弱。其值越大, 说明两节点间联系越弱; 值越小, 说明节点间联系越强。最典型的就是两种极端情况: 当两节点间无线路连接(开路)的时候, 节点间的电气距离为无穷大; 而当两节点间短路时, 其电气距离为 0。因此, 寻找两节点间的最短电气距离, 其本质就是寻找此两节点间电气联系最强的那条路径。

2 基于最短电气距离的运行方式组合

考虑到传统整定计算中所考虑厂站轮断组合范

围的局限性, 本文引入了最短电气距离作为判据, 用来预先确定更大范围厂站方式变化对保护定值的影响。

2.1 故障电流计算的厂站最短电气距离判据

保护所在线路末端故障时流过保护的电流值的大小决定着保护的灵敏性, 它是整定计算中的一个重要故障量。

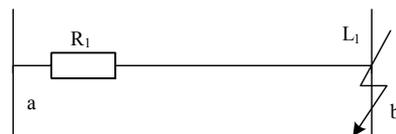


图 1 线路保护示意图

Fig.1 Illustration diagram of line protection

如图1所示, 对某系统中一线路 L_1 进行整定时, 其保护 R_1 的动作定值及灵敏度校验一般要求计算线路 ab 末端短路时流过保护的电流。

假设此系统中节点个数为 n , 边的条数为 m , 根据带权电力系统网络理论, 可求出此系统的边权邻接矩阵 W_G 。对矩阵 W_G 使用 Floyd 算法^[10] 可以进一步求出此系统所有节点对之间的最短电气距离矩阵 $D = [d_{ij}]$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。系统中节点编号为 G_i 的厂站到母线 b 的最短电气距离对应矩阵 D 中的元素 $d_{G_i, b}$ 。

理论上, $d_{G_i, b}$ 的值越小说明电源 G_i 对流经保护 R_1 的短路电流影响越大。但是, 注意到流经保护的电流的方向性, 整定保护 R_1 时, 短路电流方向应为 $a \rightarrow b$, 而 $d_{G_i, b}$ 所对应的最短供电路径有可能出现不经过 a 而直接到达 b 母线的情况, 此时从厂站 G_i 经过此供电路径流至母线 b 的电流并非整定所需电流, 故在上述情况下考虑厂站 G_i 对短路电流的影响时, 需要考虑 G_i 出口母线到短路点的故障电流分流。

为了满足此限制条件, 将系统边权邻接矩阵 W_G 中元素 w_{ab} 置为 ∞ (相当于使线路 L_1 断开), 记修改后的边权矩阵为 W'_G 。利用 W'_G 算出此时 G_i 到母线 a 的最短电气距离 $d'_{G_i, a}$, 接着对 $d'_{G_i, a}$ 的值进行如下修正:

$$d'_{G_i, b} = d_{G_i, b} * d'_{G_i, a} / (d'_{G_i, a} + d_{G_i, b}) \quad (3)$$

假设厂站运行方式发生变化时 G_i 到故障线路保护背侧母线 a 的最短电气距离 $d'_{G_i, a}$ 变化量为 $\Delta d'_{G_i, a}$, 将它代入公式(3), 得到 $d'_{G_i, b}$ 的变化量 $\Delta d'_{G_i, b}$, 则 $\Delta d'_{G_i, b}$ 值的大小便可作为判定电源点 G_i 对流经保护 R_1 故障电流的影响度的判据。

2.2 分支系数计算的最短电气距离判据

保护整定时, 为保证其选择性, 防止保护越级动作, 常常需考虑最保守的分支系数 K_f 。 K_f 取决于配合支路故障时保护支路与配合支路电流的比值, 当系统中厂站运行方式发生变化时, K_f 的大小也会随之而变。

某系统中两线路 L_1 、 L_2 保护配合关系如图2, 故障点在母线c处, 设故障时流经保护 R_1 的电流为 I_1 , 流过保护 R_2 的电流为 I_2 , 则分支系数 $K_f = I_1 / I_2$ 。

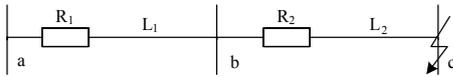


图2 保护配合示意图

Fig.2 Illustration diagram of protection coordination

从图2中可以看出, 当连接到母线b的厂站方式发生变化时会对电流 I_2 的值产生很大的影响, K_f 的大小随之变化。在考虑更大范围内的厂站方式变化对分支系数影响时, 可以将电源点到母线b的最短电气距离变化量作为相应的判据。

同2.1节所述, 为了在电源出口母线有分流的情况下使厂站到故障点供电路径经过母线b, 在利用边权邻接阵 W_G 算出最短电气距离矩阵 $D=[d_{ij}]$ 后, 对 W_G 进行修正, 利用修改后的邻接阵 W'_G 计算出系统所有节点对之间的最短电气距离矩阵 $D'=[d'_{ij}]$ 。然后分别从 D 和 D' 中取出代表电源点到母线c和母线b最短电气距离的元素 $d_{G,c}$ 、 $d'_{G,b}$, 对厂站方式变化引起的 $d'_{G,b}$ 的变化量 $\Delta d'_{G,b}$ 修正如下:

$$\Delta d''_{G,b} = \Delta d'_{G,b} * d_{G,c} / (d_{G,c} + d'_{G,b}) \quad (4)$$

$\Delta d''_{G,b}$ 的值越大, 说明厂站到电流 I_2 的影响越大, 对分支系数的影响也就越大; 反之, $\Delta d''_{G,b}$ 的值越小则说明此厂站到分支系数的影响越小。

2.3 算法步骤

1) 根据系统接线图和阻抗参数将系统用带权网络模型来描述, 并形成相应的边权邻接矩阵 W_G 。

2) 根据所整定的保护所在位置, 对邻接阵 W_G 中的相应元素进行修改, 得到修改后的邻接阵 W'_G 。

3) 使用Floyd算法分别对 W_G 和 W'_G 进行处理, 得出系统所有节点对之间的最短电气距离矩阵 $D=[d_{ij}]$ 和 $D'=[d'_{ij}]$ 。

4) 从最短电气距离矩阵 D' 中找出各厂站到保护背侧母线的最短电气距离 d_G , 根据 d_G 计算因厂站方式变化而引起的变化量 Δd_G , 若厂站出口母线

有分流, 则分别根据公式 (3)、(4) 对 Δd_G 进行修正, 最后将 Δd_G 小于事先设定的阈值的厂站纳入此保护方式组合的范畴。

3 算例

以图3所示网络为例, 假设正常方式下系统各厂站均为大方式运行, 图中各元件参数均为标么值。通过故障电流和配合系数的比较, 对本文提出的算法有效性进行了验证 (考虑 $N-1$ 切换)。

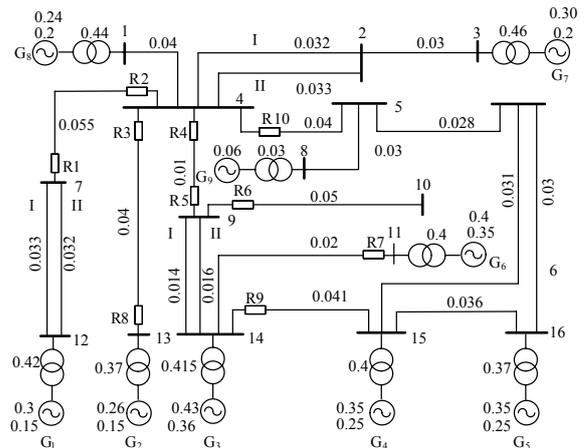


图3 算例系统

Fig.3 Test system

3.1 故障电流比较

以电流保护 R_4 为例, 在整定保护启动电流时需要要求当母线9故障时流经 R_4 的最大短路电流, 表1给出了各厂站方式变化时, 采用本文算法求出的厂站到保护 R_4 末端母线9的最短电气距离变化和实际流经电流变化排序。

表1 厂站方式变换对故障电流的影响

Tab.1 Influence on the fault current considering the operation mode switching of substations or plants

发生方式变化	厂站到母线4的最短电气距离变化 Δd_G (标么值)	变化前后流过保护 R_4 的故障电流变化 ΔI (标么值)
厂站	[排序]	[排序]
G_1	0.15/[1]	0.231/[1]
G_2	0.11/[2]	0.228/[2]
G_3	0.0233/[7]	0.004/[7]
G_4	0.0307/[6]	0.037/[6]
G_5	0.0333/[5]	0.048/[5]
G_6	0.0167/[8]	0.003/[8]
G_7	0.1/[3]	0.184/[3]
G_8	9.546/[4]	0.111/[4]

从图3可以看到厂站G₃~G₆均属于出口母线处有故障电流的情况,故表1中G₃~G₆的 Δd_G 均是经过修正的值。从表中数据的对比可以看出,厂站到保护背侧母线的电气距离变化很精确地表征了它对保护对侧母线故障时流经保护故障电流的影响程度,与前面理论分析的结果一致。

3.2 分支系数比较

以保护R5和R10配合为例,表2给出了考虑N-1切换时各厂站到保护R10背侧母线4最短电气距离变化量和实算分支系数影响排序。

表2 厂站方式变换对分支系数的影响

Tab.2 Influence on the branch coefficient considering the operation mode switching of substations or plants

厂站 编号	所切厂站到母线4的最短电 气距离变化 Δd_G (标么值) [排序]	切换后保护对R5/R10的分 支系数变化 ΔK_f (标么值) [排序]
G ₁	0.15/[1]	0.0158/[1]
G ₂	0.11/[2]	0.0157/[2]
G ₃	0.0652/[4]	0.0090/[5]
G ₄	0.0623/[5]	0.0095/[4]
G ₅	0.0546/[6]	0.0079/[6]
G ₆	0.0457/[7]	0.0068/[7]
G ₇	0.1/[3]	0.01/[3]
G ₈	0.04/[8]	0.0043/[8]

表2中数据表明厂站方式变化时,该厂站到配合保护背侧母线的最短电气距离大小变化量能较准确地反映厂站方式变化前后的分支系数变化量。

4 结语

本文基于复杂网络理论,将电力系统网络用带权电力网络模型来描述,并根据此模型的特点阐述了基于最短电气距离的方式组合方法,本文方法可以对传统运行方式组合所不能考虑到的更大范围内的厂站进行分析,将其中对整定参数影响大于一定阈值的厂站找出进行方式组合,提高保护定值的合理性。最后通过算例系统验证了算法的正确性和有效性。

参考文献

[1] DL/T 559-1994 220~500 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].
 [2] 严琪, 杨雄平, 陈金富, 等. 配电网继电保护整定计算中的运行方式搜索[J]. 继电器, 2005, 33 (21): 5-8.
 YAN Qi, YANG Xiong-ping, CHEN Jin-fu, et al. Study on searching mode operating for distributed

power network in relay coordination[J]. Relay, 2009, 33 (21): 5-8.
 [3] 杨雄平, 段献忠. 基于厂站方式灵敏系数的运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 69-73.
 YANG Xiong-ping, DUAN Xian-zhong. A method for combining the operation modes based on the operation mode switching sensitivity factor of power substations or plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 69-73.
 [4] 杨雄平, 段献忠, 石东源. 基于环网电气耦合指标的运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (23): 64-68.
 YANG Xiong-ping, DUAN Xian-zhong, SHI Dong-yuan. Method for operation mode combination based on electric coupling of mesh network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 64-68.
 [5] 谢琼瑶, 邓长虹, 赵红生, 等. 基于有权网络模型的电力网节点重要度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (4): 21-24.
 XIE Qiong-yao, DENG Chang-hong, ZHAO Hong-sheng, et al. Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (4): 21-24.
 [6] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 11 (11): 79-83.
 TAN Yue-jin, WU Jun, DENG Hong-zhong. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks[J]. System Engineering Theory and Experience, 2006, 11 (11): 79-83.
 [7] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (12): 1-5.
 CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (12): 1-5.
 [8] 丁明, 韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (17): 6-10.
 DING Ming, HAN Ping-ping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (17): 6-10.
 [9] Surdu tovich G, Cortez C, Vitilina R, et al. Dynamics of "small world" networks and vulnerability of the electric power grid[C].//Proceedings of 8th Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Brasilia(Brazil): 2002.

(下转第37页 continued on page 37)

- [3] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价电网技术[J]. 电网技术, 2000, 24 (6): 46-49.
JIA Qing-quan, SONG Jia-hua, LAN Hua, et al. Quality of electricity commodity and its fuzzy evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24 (6): 46-49.
- [4] 《电力节能技术丛书》编委会. 电能质量与节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
The Editorial of 《The Series of Power Saving Technology》. Power quality and energy-saving technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [5] 李世林, 刘军成. 电能质量国家标准应用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
LI Shi-lin, LIU Jun-cheng. National standard application manual of power quality[M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [6] 李金超, 李金颖, 牛东晓, 等. 考虑区间数概率分布的电力客户价值综合评价[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(4): 56-58, 65.
LI Jin-chao, LI Jin-ying, NIU Dong-xiao, et al. Comprehensive evaluation on power customer's value based on probability distribution of interval numbers[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(4): 56-58, 65.
- [7] 陈祖云, 杨胜强, 邬长福. 基于熵权与未确知测度模型及其在煤矿安全评价中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34 (1): 75-77.
CHEN Zu-yun, YANG Sheng-qiang, WU Chang-fu. The model based on entropy weight and unascertained measure and its application in the evaluation in coal mine safety[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007, 34 (1): 75-77.
- [8] 石华旺, 高爱坤, 牛俊萍. 一种基于熵权的未确知测度评价方法及应用[J]. 统计与决策, 2008 (12): 162-164.
SHI Hua-wang, GAO Ai-kun, NIU Jun-ping. A evaluation method based on entropy weight and unascertained measure and its application[J]. Statistics and Decision, 2008 (12): 162-164.
- [9] 陈娟, 刘凌. 基于熵权的未确知测度模型在湖库富营养化评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (4): 452-455.
CHEN Juan, LIU Ling. Application of unascertained measure model based on entropy weight to evaluation of eutrophication of lakes and reservoirs[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36 (4): 452-455.

收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2009-11-02

作者简介:

贾正源 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力市场理论与应用;

赵亮 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为技术经济评价理论与应用。E-mail: zhldavid7@163.com

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [10] 肖位枢. 图论及其算法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [11] 程小平. 配合系数与网络结构的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (9): 52-55.
CHENG Xiao-ping. Study on relation between network topology and cooperation coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 52-55.
- [12] Gswamt S K, Basu S K. A computer package for teaching relay coordination and loop based network solution[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (2): 572-578.
- [13] 杨雄平, 石东源, 段献忠. 计及厂站方式切换的快速故障计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30 (20): 46-51.
YANG Xiong-ping, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong. A fast fault calculation method considering switching of operation conditions of substations or plants[J]. Power System Technology, 2006, 30 (20): 46-51.
- [14] 曹国臣, 蔡伟国, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (10): 51-56.
CAO Guo-chen, CAI Guo-wei, WANG Hai-jun. Problems and solutions in relay setting and coordination [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (10): 51-56.
- [15] 曹国臣, 李娟, 张连斌. 继电保护运行整定中分支系数计算方法的研究[J]. 继电器, 1999, 27 (2): 5-9.
CAO Guo-chen, LI Juan, ZHANG Lian-bin. Study on method to calculate branch coefficient in relay setting and coordination[J]. Relay, 1999, 27 (2): 5-9.
- [16] 杨洋, 王慧芳, 时洪禹. 继电保护整定计算中运行方式的选择方法[J]. 继电器, 2006, 34 (20): 1-4.
YANG Yang, WANG Hui-fang, SHI Hong-yu. Setup and choice method for operating mode in protection setting calculation software[J]. Relay, 2006, 34 (20): 1-4.

收稿日期: 2009-09-08

作者简介:

李运坤 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: dnacc2004@yahoo.com.cn

吕飞鹏 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统;

蒋科 (1983-), 男, 硕士, 从事电力调度工作。