

# 基于线路介数的多组同基最小断点集选取方法

张向亮,吕飞鹏,张新峰,肖飞,邓丰强,吕文超,赵美琳

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

**摘要:**最小断点集(MBPS)是复杂环网整定配合的起始点,它的求取往往会出现多组同基解。考虑线路对断点脆弱性的影响,并以带权重的线路介数作为衡量线路重要程度的指标,给出了一种多组同基MBPS的选取方法。最后通过算例验证了算法的有效性和可行性。

**关键词:**整定;最小断点集;线路介数;复杂网络

**Abstract:** The minimum break point set ( MBPS) is the starting point for the relay setting coordination of complex ring network. During its solution, it always has multi - MBPS with the same cardinal number. Putting breakpoints of MBPS into the exit of the less vulnerable lines can greatly reduce the impact of breakpoint vulnerability on the grid. The weighted line betweenness of complex network theory is taken as an indicator to measure the importance of the line. Based on the indicator, a method for selecting the MBPS from multi - MBPS with the same cardinal number is proposed. The method estimates the betweenness of lines which the breakpoints of the MBPS calculation result belong to, then takes the sum of line betweenness of each MBPS, and finally chooses the MBPS of the least betweenness as the optimum MBPS. The numerical example can prove that this method can obtain the optimum MBPS.

**Key words:** setting; minimum break point set; line betweenness; complex network

中图分类号: TM751 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2011)04 - 0075 - 04

在复杂环网中,最小断点集(minimum break point set, MBPS)的求取往往会出现多组同基解<sup>[1-3]</sup>,需要从中选取一组MBPS作为整定配合的起点。断点保护定值通常不按配合来整定,所以这些保护存在拒动或误动的可能,使断点成为全网保护的一个脆弱环节。若断点保护在系统中处于重要位置,则该保护拒动或误动会对系统安全稳定运行产生较大影响,所以应把断点选在重要性低的位置。针对上述问题,文献[4]提出了一种以节点重要度为衡量指标的多组同基MBPS选取方法,避免了计算机随机选取的盲目性和整定人员手动选取的繁琐性,但是并未考虑发电机的分布和出力对系统稳定性的影响,不符合系统的实际情况,所提方法存在一定的局限性。

结合系统实际情况,考虑线路<sup>[5,6]</sup>对断点脆弱性的影响,把断点尽可能选在重要性低的线路出口处,选用文献[6]提出的有权电网模型,以带权重的线路介数衡量线路的重要程度,基于此指标,从多组同基MBPS中选取一组MBPS作为整定配合的起点。

## 1 有权电力网络和线路介数

### 1.1 有权电力网络

电网具有小世界性和无标度性,可视为一类典型的复杂网络。将电网简化,其简化原则为:网络节点就是发电机、变电站、负荷,边就是传输线。详细原则如下:①考虑除电厂和变电站母线外的所有线路;②网络中所有节点分为3种,发电机节点、变电站节点、负荷节点;③所有电力线路均简化为无向有权边,线路的权重定义为线路的电抗标么值,并定义网络中两节点之间所有电气路径中沿线权值之和最小的路径称为最短电气路径,其中最小的权值之和称为最短电气距离;④合并同杆并架输电线,不计并联电容支路。

经过简化,电网成为一张有 $n$ 个节点和 $m$ 条边的连通图 $G$ ,由 $n \times n$ 边权连接矩阵 $E$ 和 $n \times 1$ 权重矩阵 $W$ 表示。其中,

$$G = (N, L) \tag{1}$$

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$W = [W_1, W_2, \cdots, W_n] \tag{3}$$

式中  $N$  为电网中节点集合  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $L$  是一组有权边的集合  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 。

边权连接矩阵  $E$  的矩阵元素  $E_{ij}$  为

$$E_{ij} = \begin{cases} 0 & i=j \\ X_{ij} & i \neq j, \text{且}(i, j) \text{为图 } G \text{ 的边} \\ \infty & i \neq j, \text{且}(i, j) \text{非图 } G \text{ 的边} \end{cases}$$

式中的  $X_{ij}$  是节点  $i$  和节点  $j$  之间的电抗值。一般假设  $X_{ij} = X_{ji}$ , 可知矩阵  $E$  是对称的。矩阵  $W$  的元素  $W_i$  为发电机  $i$  的权重, 定义为其在当前运行方式下的有功功率的输出。

### 1.2 电网中的线路介数

文献 [7] 使用线路介数作为脆弱线路的辨识指标。在实际电力系统中, 除网络拓扑结构外, 发电机的分布和出力也对系统稳定性有着重要的影响。任意一条线路  $(m, n)$  被发电机  $i$  和负荷  $j$  间最短电气路径经过, 则该线路需要承担发电机  $i$  带来的负载  $W_i$ 。在此, 可定义线路  $(m, n)$  带权重的介数  $B_{LW}(m, n)$ , 即被电网中发电机节点与负荷节点间的最短电气路径经过而承受的负载和, 如式 (4)。

$$B_{LW}(m, n) = \sum_{k \in S_v} W_k \quad (4)$$

式中  $S_v$  是经过线路  $(m, n)$  最短电气路径的发电机序号集合;  $W_k$  是发电机  $k$  给线路  $(m, n)$  带来的负载。

该方法在计算最短电气路径时可能会绕过一些重要线路, 应采取补偿性措施, 将电网中带权重的线路介数提高到其相邻线路中介数最高值, 如式 (5)。

$$\bar{B}_{LW}(m, n) = \max(B_{LW}(m, i), B_{LW}(j, n)) \quad (5)$$

式中  $(m, i)$  和  $(j, n)$  分别表示所有与节点  $m$  和节点  $n$  相连的线路。

若将断点选在介数较高的线路上, 断点脆弱性表现得较明显, 对系统安全稳定运行会产生较大影响, 宜将断点尽量选在介数低的线路出口处。在多组同基 MBPS 问题上, 应选取断点所属线路的介数之和最小的 MBPS 作为整定配合的起始点。

## 2 算法步骤

这里算法步骤如下: ①根据相关文献计算 MBPS 的算法得出复杂网络的多组同基 MBPS, 并将其涉及的所有断点所属线路存入集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  中; ②由电网实际数据, 根据上述简化原则化简, 确定图  $G$  的边权连接矩阵  $E$  及发电机权重矩阵  $W$ ; ③根

据边权连接矩阵  $E$  计算整个网络的最短电气距离矩阵  $L$ ; ④寻找所有发电机节点与负荷节点之间的最短电气路径集合  $S_L$ ; ⑤用式 (4) 对  $S_L$  进行处理, 计算每条线路的带权重线路介数  $B_{LW}(m, n)$ ; ⑥用式 (5) 对步骤 5) 求出的  $B_{LW}$  进行补偿, 算得补偿后的各条线路的带权重线路介数  $\bar{B}_{LW}(m, n)$ ; ⑦计算由步骤 1) 得到的各组同基 MBPS 中断点所属线路的带权重线路介数之和, 选取其中线路介数最低的一组 MBPS 作为整定计算的起始点。

## 3 算例分析

算例所用电力网络拓扑如图 1 所示, 并在图中标出发电机节点 7、10 和负荷节点 3、4。而且发电机节点 7 的有功出力标么值为 6, 发电机节点 10 的有功出力标么值为 10。

依据文献 [3] 提出的方法, 可以求出该电网的最小断点集, 即 3 组同基 MBPS, 分别记为:  $M_1 = \{2, 3, 1, 4, 3, 19, 20, 34, 35, 26, 16, 17, 18\}$ ;  $M_2 = \{2, 3, 2, 1, 4, 3, 19, 20, 19, 30, 28, 13, 25, 14\}$ ;  $M_3 = \{2, 3, 2, 1, 4, 3, 19, 20, 30, 29, 28, 16, 17, 18\}$ 。

由图 1 可知, 保护与线路的所属关系见表 1。

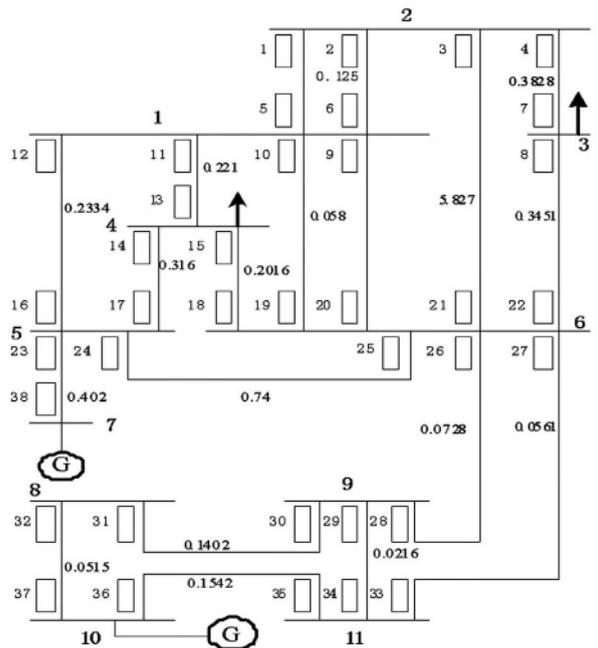


图 1 算例系统

步骤 1): 根据表 1 可得该 3 组 MBPS 中所有保护所属的线路集合  $A = \{(1, 2), (2, 6), (2, 3), (1, 4), (4, 5), (1, 5), (4, 6), (1, 6), (5, 7), (5, 6), (6,$

表1 保护与线路的所属关系

保护编号	保护所属线路	保护编号	保护所属线路
1 2	(1 2)	19 20	(1 6)
3	(2 6)	23	(5 7)
4	(2 3)	25	(5 6)
13	(1 4)	26 28	(6 9)
14 17	(4 5)	29 34	(9 11)
16	(1 5)	30	(8 9)
18	(4 6)	35	(10 11)

9) (9 11) (8 9) (10 11)}。

步骤2): 根据图1可得边权连接矩阵E以及发电机节点权重矩阵。

$$W = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 6 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0]$$

步骤3): 根据步骤2)求出的边权连接矩阵E算出电网的最短电气距离矩阵L。

步骤4): 根据步骤3)求出的最短电气距离矩阵L通过C#编程可求出发电机节点和负荷节点间最短电气路径组成最短电气路径集合  $S_L = \{\{3, 6, 1, 5,$

$$E =$$

0	0.125	∞	0.221	0.233 4	0.058	∞	∞	∞	∞	∞
0.125	0	0.382 8	∞	∞	5.827	∞	∞	∞	∞	∞
∞	0.382 8	0	∞	∞	0.345 1	∞	∞	∞	∞	∞
0.221	∞	∞	0	0.316	0.201 6	∞	∞	∞	∞	∞
0.233 4	∞	∞	0.316	0	0.74	0.402	∞	∞	∞	∞
0.058	5.827	0.345 1	0.201 6	0.74	0	∞	∞	0.072 8	∞	0.056 1
∞	∞	∞	∞	0.402	∞	0	∞	∞	∞	∞
∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0.140 2	0.051 5	∞
∞	∞	∞	∞	∞	0.056 1	∞	0.140 2	0	∞	0.021 6
∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.051 5	∞	0	0.154 2
∞	∞	∞	∞	∞	0.056 1	∞	∞	0.021 6	0.154 2	0

$$L =$$

0	0.125	0.403 1	0.221	0.233 4	0.058	0.635 4	0.271	0.130 8	0.268 3	0.114 1
	0	0.382 8	0.346	0.358 4	0.183	0.760 4	0.396	0.255 8	0.393 3	0.239 1
		0	0.546 7	0.636 5	0.345 1	1.038 5	0.558 1	0.417 9	0.555 4	0.401 2
			0	0.316	0.201 6	0.718	0.414 6	0.274 4	0.411 9	0.257 7
				0	0.291 4	0.402	0.504 4	0.364 2	0.501 7	0.347 5
					0	0.693 4	0.213	0.072 8	0.210 3	0.056 1
						0	0.906 4	0.766 2	0.903 7	0.749 5
							0	0.140 2	0.051 5	0.161 8
								0	0.175 8	0.021 6
									0	0.154 2
										0

7) {4 5 7} {4 6 11 10} {3 6 11 10}}。

步骤5): 根据  $S_L$  和公式(4)可以得出多组同基MBPS所有保护所属线路的介数,如表2。

步骤6): 用式(5)对步骤5)算出的线路介数进行补偿,如表3。

步骤7): 根据表1和表3可以算出3组同基断点集  $M_1, M_2, M_3$  线路介数之和分别为204、182、184。可见  $M_2$  的线路介数最小,选  $M_2 = \{23, 2, 1, 4, 3, 19, 20, 19, 30, 28, 13, 25, 14\}$  为环网整定配合的起始点。

表2 相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	0	(1 6)	6
(2 6)	0	(5 7)	12
(2 3)	0	(5 6)	0
(1 4)	0	(6 9)	0
(4 5)	6	(9 11)	0
(1 5)	6	(8 9)	0
(4 6)	10	(10 11)	20

表3 补偿后的相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	6	(1 6)	20
(2 6)	20	(5 7)	12
(2 3)	16	(5 6)	20
(1 4)	10	(6 9)	20
(4 5)	12	(9 ,11)	20
(1 5)	12	(8 9)	0
(4 6)	20	(10 ,11)	20

## 4 结 语

基于复杂网络理论和有权网络模型,提出了带权重线路介数的概念,来量化电力系统线路脆弱的程度,将其作为选取多组同基 MBPS 的指标。该方法考虑了发电机分布和出力,符合系统的实际情况,能够较好地辨识那些承担功率不大,但是由于其在电网拓扑中的特殊位置而对系统产生重大影响的线路。所做工作还比较粗糙,可以继续开展深入研究,如在符合电力系统的实际情况下,进一步完善评估指标,考虑运行方式等因素。

(上接第74页)

若  $K$  值设定偏低,也不会造成保护装置的误动进而影响电力系统的可靠运行,仅仅会在发生故障的情况下除了能正确判断某相存在故障,同时还会错误判断正常相也存在故障。而这样的“误判”所导致的结果除了在故障排除的检修维护过程中增加一定工作量,对电力系统的安全稳定运行并不存在任何实质性的影响,并且该判断依据计算简单,所用数据量较少,能在很短暂的时间内就对变压器的运行状况做出判断,因此可以说该方法有着一定的可行性和实用性。

### 参考文献

[1] 王维俭,王祥珩,王赞基.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006:205-208.

[2] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等.2007年国家电网公司继电保护装置运行情况[J].电网技术,2008,32(16):6-7.

[3] 王维俭.变压器保护运行不良的反思[J].电力自动化设备,2001,21(10):1-3.

[4] “九五”期间全国电网继电保护统计资料汇编,2001.

### 参考文献

[1] 吕飞鹏.基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):65-69.

[2] 刘丹,吕飞鹏.基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J].电力系统自动化,2008,32(16):24-27.

[3] 刘丹,吕飞鹏.基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J].电力系统自动化,2008,32(21):27-31.

[4] 李运坤,吕飞鹏,陈新,等.基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J].电力系统自动化,2010,12(34):58-60.

[5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.

[6] 倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.

[7] 曹一家,陈晓钢,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.

作者简介:

张向亮(1987),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

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。

(收稿日期:2011-04-02)

[5] 葛宝明,王祥晰,苏鹏声,等.电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J].电力系统自动化,2003,27(22):1-5.

[6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J].中国电机工程学报,2002,22(3):7-11.

[7] 孙国凯,霍利民,柴玉华.电力系统继电保护原理[M].北京:中国水利水电出版社,2002:123-124.

[8] Kezunovic, M, Kojovic, L. Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. IEEE Transactions on, 1994, 9(1): 405-413.

[9] Mallat S., Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

作者简介:

高志勇(1971),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

成建军(1973),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

张昕(1980),男,四川成都人,助理工程师,从事电力系统运行监控工作。

(收稿日期:2011-03-17)