

基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略

于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 戴国安, 李延龙, 张爱玲

(许继电气股份有限公司, 河南省许昌市 461000)

摘要: 提出了一种基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略。建立了交流场等效模型和最后断路器图论求解模型, 将交流场抽象为无向连通图, 断路器抽象为图的边, 线路和阀组等其他设备抽象为图的节点, 从而将最后断路器的求解问题转换为无向连通图求解割边的问题, 实现了交流场最后断路器快速、准确、智能的判断, 该策略在工程中的实施有利于电网安全可靠运行。

关键词: 特高压直流; 最后断路器; 自适应策略; 图论

0 引言

最后断路器是在特高压直流输电工程交流场中用于隔断交流输入线路与换流阀之间的关键断路器, 即只需分断一个断路器, 所有的线路与阀组将被隔断。最后断路器是直流工程中的一种重要保护手段, 用于特殊情况下分断最后断路器, 将对应的阀组迅速闭锁, 以保证系统安全可靠的运行^[1-3]。

线路与阀组之间最后断路器的个数可以是一个、多个、或者零个, 具体根据当前交流场阀组、线路配置, 以及所有断路器的分合状态而定。在实际工程中, 换流站的建设分期进行, 换流站的线路也是分期投入, 从而导致最后断路器的判断逻辑需要经常修改, 再加上现场不便于试验验证, 有可能为工程的长期运行埋下隐患。以往国内外直流工程中最后断路器的判断大多基于数据统计的方法, 繁琐、耗时且容易出错^[4-5]。因此, 工程调试人员迫切需要一种智能的方法, 以便快速准确地判断对应阀组的最后断路器。文献^[6-7]将图论引入到电力系统输电断面快速判断中, 对解决类似的工程问题具有很好的参考价值。本文根据交流场线路和阀组的配置特点, 提出了一种基于图论的最后断路器自适应判断策略, 将交流场抽象为图论中的无向连通图, 将断路器抽象为图的边, 将其他设备抽象为图的节点, 最终将最后断路器的求解问题转换为无向连通图求解割边的问题, 实现了最后断路器快速、准确、智能的求解。

1 交流场等效模型

特高压直流工程交流场的等效模型如图 1 所

示, 其中 BB1 和 BB2 为交流母线, 交流母线之间由若干分支(3/2 串)并联组成^[8-9], 每个分支串有 3 个断路器, 每两个断路器之间可以接入阀组、线路或其他设备(交流滤波器, 站用电、隔刀、地刀等)。交流场中可配置出线断路器, 如 L1 和 L2, 计算时需将其计入最后断路器的判断逻辑中。

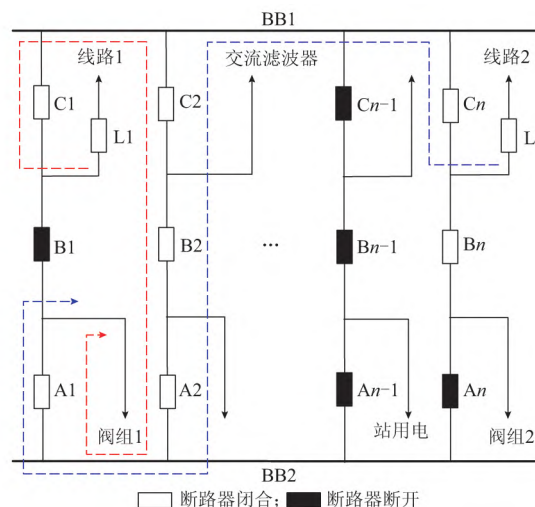


图 1 交流场等效模型

Fig.1 Equivalent model of the AC field

本文为求解交流场所有线路到每个阀组的最后断路器, 因此忽略交流场接入的交流滤波器等其他设备。其中分支的数量, 接入线路的条数和投入阀组的个数可以按照工程的不同阶段自由配置。本图实线部分表示的交流场共有 4 个分支, 分别接入了 2 个线路和 2 个阀组, 由图 1 红色和蓝色虚线表示的路径可以看出, 线路 1 和线路 2 均必须经过断路器 A1, A2, B2, C2 才可以到达阀组 1, 分断其中任意一个, 所有线路与阀组 1 将被隔断, 因此可以简单地

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-06-28。

上网日期: 2015-12-28。

判断出 $A1, A2, B2, C2$ 都是所有线路到阀组 1 的最后断路器。其中, 阀组 2 仅有一个最后断路器 Bn 。

当然, 实际工程中交流场的分支串数、线路接入条数和阀组投入个数比较多, 断路器的分合状态也是千变万化, 使得最后断路器的判断变得异常繁琐。

2 最后断路器图论求解模型

图论中的图是由若干个给定的节点及若干条连接两个节点的边所构成的图形, 这种图形可以用来描述某些事物之间的某种特定关系, 用节点代表事物, 用连接两个节点的边表示相应两个事物间具有这种关系^[10-11]。

为了便于计算机运算, 通常使用邻接矩阵来表示图中各节点之间的关系。设 $G(V, E)$ 是一个具有 n 个节点的无向连通图, V 为所有节点的集合, E 为所有节点之间边的集合, 则图的邻接矩阵是一个 $n \times n$ 的二维数组, 这里用 $E_{dge}[n][n]$ 表示, 它的定义为:

$$E_{dge}[i][j] = \begin{cases} 1 & (V_i, V_j) \in E \text{ 或 } (V_j, V_i) \in E \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

这里需要引入图论的另一概念即割边, 即在无向连通图 G 中, e 是其一条边, 如果去掉 e 后, 图 G 不再连通, 则 e 称为图 G 的割边。这里定义一个割边的集合 E_p , 即删除 E_p 中的任意一条割边, 图 G 不再连通。

使用图论的方法求解交流场所有线路到每个阀组的最后断路器, 需要根据交流场配置的特点建立图论求解模型。这里将交流场等效为一个无向连通图, 将断路器等效为无向连通图的边, 将交流母线、阀组、线路等效为无向连通图的节点, 分支中相邻断路器之间通过节点相连。为简化搜索运算, 可将所有输入线路汇集为一个节点 L , 则无需单独搜索每条线路到阀组之间的最后断路器, 只需搜索线路汇集节点 L 到阀组的最后断路器即可。

交流场最后断路器图论求解模型如图 2 所示, 为了完善图论求解模型, 增加了阀组与接入节点之间的虚拟连通边, 如 $S1$ 和 $S2$, 最后断路器计算结果中需要将其去除。

由以上图论模型可以建立各个阀组及其相关节点之间的邻接矩阵。具体生成方法是: 如果两个节点之间有边连接, 并且该边代表的断路器为闭合状态, 则对应邻接矩阵中的元素为 1, 否则为 0。与阀组 1 相关节点之间的邻接矩阵如图 3 所示。

无向连通图的邻接矩阵是一个对称矩阵, 图 3 矩阵中元素为 1 的个数为 20, 对应图 2 中除了与阀

组 2 相邻的虚拟连通边 $S2$ 以外的 10 个连通边, 即 10 个闭合的断路器。

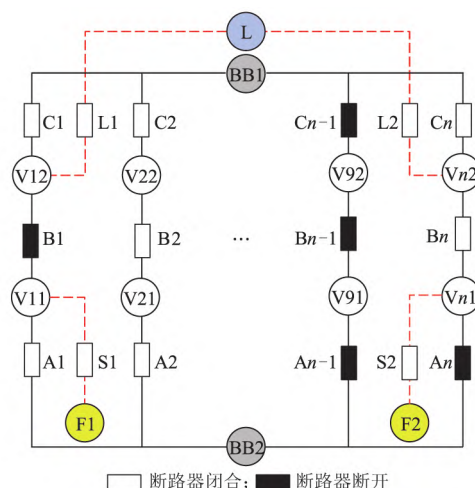


图 2 最后断路器图论求解模型
Fig.2 Solving model of the last breaker based on graph theory

	V11	V12	V21	V22	...	Vn1	Vn2	BB1	BB2	L	F1
V11	0	0	0	0	...	0	0	0	0	1	0
V12	0	0	0	0	...	0	0	0	0	1	0
V21	0	0	0	1	...	0	0	0	0	1	0
V22	0	0	1	0	...	0	0	0	0	1	0
...
Vn1	0	0	0	0	...	0	0	0	0	1	0
Vn2	0	0	0	0	...	0	0	1	0	1	0
BB1	0	1	0	1	...	0	0	1	0	0	0
BB2	1	0	1	0	...	0	0	0	0	0	0
L	0	1	0	0	...	0	0	0	1	0	0
F1	1	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0

图 3 阀组 1 相关节点的邻接矩阵
Fig.3 Adjacency matrix of the related node for the first converter

另外, 为了今后工程扩建的需要, 图论模型中分支串数可以大于等效模型中实际的串数, 即预留几个虚拟分支, 该虚拟分支上的断路器全设为分断状态, 邻接矩阵中断路器对应的元素全为 0, 路径搜索时会自动跳过非连通的边。

3 最后断路器自适应判断策略设计

本文提出的自适应判断策略是, 在图 2 最后断路器图论求解模型中, 以输入线路汇集节点 L 为起点, 以某一阀组节点为终点, 搜索起点到终点之间割边的集合, 集合中的每条割边代表一个最后断路器, 该集合即为交流场所有接入线路到某一阀组最后断路器的集合。集合里割边的个数可以是一个、多个或者零个, 删除集和中任意一条割边, 即分断集合里任意一个断路器, 起点到终点之间不再连通, 所有线

路与阀组将被隔断。

求解无向连通图指定两点之间的割边可以使用深度优先搜索算法,其算法思想是,首先选择图中任意一个未被访问过的节点作为起始点开始搜索,若被搜索到的节点满足从未被访问过,则将该节点标记为已访问,同时以该节点为起点继续搜索,如此反复,直到图中所有的节点均被访问。深度优先搜索是对图进行遍历的算法之一,在遍历的过程中可以设置不同的回退条件和判断逻辑,解决不同的工程问题^[12]。本文设置的深度优先搜索判断方法如下。

1) 指定起点和终点,搜索起点到终点之间的所有路径。

2) 记录路径的条数以及每条边的遍历次数(小于等于路径条数)。

3) 路径中所有遍历次数等于路径条数的边都是割边。

本方法的输入量是最后断路器图论求解模型的邻接矩阵、起点、终点,输出结果是起点到终点之间的所有路径、路径条数、各边遍历次数,以及经过判断输出的割边集合。

由以上方法得到的图2阀组1计算结果如表1所示。

表1 图2阀组1最后断路器计算结果
Table 1 Computed result of last breaker for the first convertor in Fig.2

F1 路径条数	F1 路径	F1 各边遍历次数	F1 割边的集合
2	L→L1→C1→C2→B2→	C2=2; B2=2;	C2, B2, A2, A1
	A2→A1→S1→F1;	A2=2; A1=2;	
	L→L2→Cn→C2→B2→	L1=1; L2=1;	
	A2→A1→S1→F1	C1=1; Cn=1	

表2 图4阀组1与阀组3最后断路器计算结果

Table 2 Computed result of last breaker for the 1st and 3rd convertor in Fig.4

F1 路径条数	F1 路径	F1 各边遍历次数	F1 割边的集合	F3 路径条数	F3 路径	F3 各边遍历次数	F3 割边的集合
5	L→B5→A5→A1→	A1=5; B1=5; A5=2; B5=2;	B1, A1	6	L→B4→A4→A5→F1;	A5=3; B5=3; C5=3; A2=3; B2=3; C2=3; A4=2; B4=2	无
	B1→F1;				L→A2→A5→F1;		
	L→B2→C2→C5→				L→C5→C2→B2→A2→		
	B5→A5→A1→				A5→F1;		
	B1→F1;	B2=2; C2=2;			L→B5→F1;		
	L→A2→A1→B1→	A4=1; B4=1			L→B4→A4→A2→B2→		
	F1;				C2→C5→B5→F1;		
	L→C5→C2→B2→				L→B2→C2→C5→B5→F1		
	A2→A1→B1→F1						

4 应用实例

实际直流工程在投运、运行、停运的过程中断路器的分合状态经常变化,需要交流站控系统实时采

交流场所有线路到阀组1的路径共有2条,其中只有断路器C2, B2, A2, A1遍历的次数等于2,其他边的遍历次数均小于2,由此判断出C2, B2, A2, A1即是所有线路到阀组1的最后断路器。需要注意的是, S1是与阀组1邻接的虚拟连通边,需要将其从割边的集中去除。另外,起点和终点也不计入集合中。

换流站在建设初期由于引入的线路有限,只需投入低端阀组,随着建设的推进会引入更多的线路,继而投入高端阀组。图4在图1的基础上增加了1个分支,2条线路和1个阀组,线路和阀组的接入位置做了部分调整。该交流场中没有配置出线断路器,但在图论模型中,每条线路和接入节点之间仍存在一条虚拟连通边,即与阀组和接入节点之间的虚拟连通边一样,参与路径搜索运算,但不在计算结果中输出。图4阀组1和阀组3的计算结果见表2。

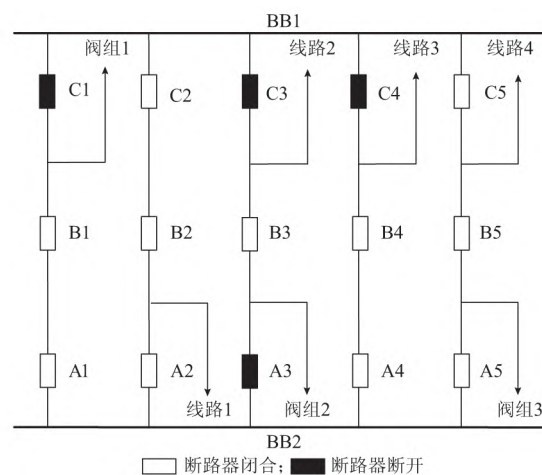


图4 交流场扩建等效模型

Fig.4 Equivalent model of the extended AC field

集、计算和处理,这就要求最后断路器的判断必须是一个实时、在线、自动的过程。

这里由系统实时采集并输入交流场所有断路器

的分合状态,工程调试人员在线配置线路和阀组的接入位置参数。系统由此自动生成并实时更新阀组及其相关节点之间的邻接矩阵。本文策略在实际工程中的实现流程如图 5 所示。

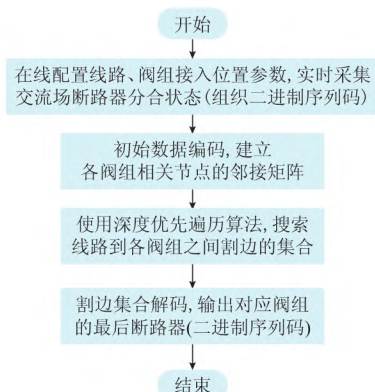


图 5 最后断路器自适应策略流程图

Fig.5 Flow chart of the self-adaption strategy for the last breaker

HCM3000 直流输电控制保护装置是一个基于 VxWorks 嵌入式系统的连续功能图编程平台(可程序控制器),其硬件部分包括一个 VME 机箱和十几种处理器、I/O、通信板卡,软件部分包含了算术、逻辑、通信、故障诊断等几百个功能块,其内部由 C 代码编写,外部封装起来供工程应用编程人员调用,可实现直流工程中各种控制保护功能。基于本文策略编写和封装的最后断路器自适应判断功能块(LAST_CB)及其平台运行结果如图 6 所示,其输入输出定义如下。

1) STA_ACT 由系统自动输入实时采集的交流场所有断路器分合状态(二进制序列码)。

2) BAY_1A—BAY_10C 为每个分支两断路器之间线路和阀组的配置参数,“2”表示接入阀组,“3”表示接入线路。

3) BAY_N 为当前交流场有效分支串数。

4) LCB_G1—LCB_G4 分别输出 4 个阀组的最后断路器计算结果(二进制序列码)。

系统采集断路器的分合状态后,需要组织成装置能够识别的二进制输入序列码,有效位数由断路器的实际个数而定。其组织规则是:从交流场左上角开始,从上到下,从左到右依次排列;生成的二进制序列从右到左,从低位到高位排列,“1”为合,“0”为分。图 4 交流场断路器对应的二进制序列及其含义如下:

$$\begin{bmatrix} A5B5C5 & A4B4C4 & A3B3C3 & A2B2C2 & A1B1C1 \\ 111 & 110 & 010 & 111 & 110 \end{bmatrix} \quad (2)$$

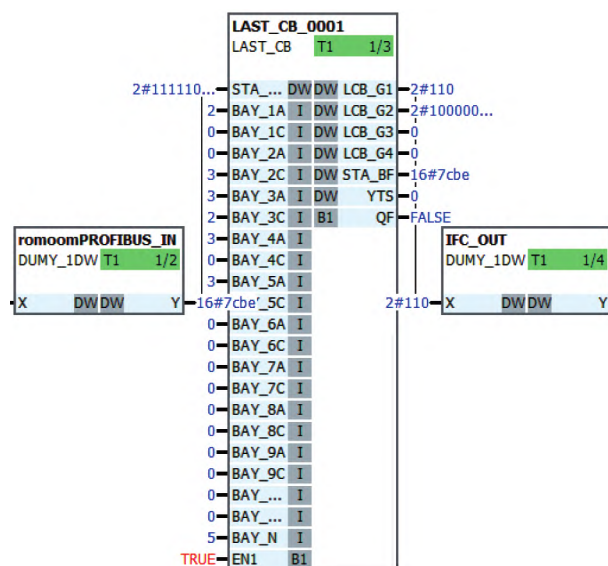


图 6 最后断路器计算结果

Fig.6 Computed result of the last breaker

经过 LAST_CB 模块计算,输出图 4 各阀组最后断路器的计算结果,其结果也是一个二进制序列,由低位到高位依次代表交流场从上到下,从左到右每个断路器,“1”表示该位代表的断路器是最后断路器,“0”则不是。阀组 1 最后断路器的计算结果 LCB_G1 为:

$$\begin{bmatrix} 000 & 000 & 000 & 000 & 110 \\ A5B5C5 & A4B4C4 & A3B3C3 & A2B2C2 & A1B1C1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

表示阀组 1 的最后断路器为 A1, B1。

阀组 2 的计算结果 LCB_G2 为:

$$\begin{bmatrix} 000 & 000 & 010 & 000 & 000 \\ A5B5C5 & A4B4C4 & A3B3C3 & A2B2C2 & A1B1C1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表示阀组 2 只有 1 个最后断路器 B3。

阀组 3 的计算结果 LCB_G3 为:

$$\begin{bmatrix} 000 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ A5B5C5 & A4B4C4 & A3B3C3 & A2B2C2 & A1B1C1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

表示阀组 3 没有最后断路器。

另外,如果交流场中配有出线断路器,需要将出线断路器的实时分合状态组织到二进制输入序列码中,并且在每个阀组最后断路器计算结果中输出。

最后断路器自适应判断策略在直流工程中的应用过程是,系统由分布式测控装置实时采集交流场所有断路器的分合状态,通过 PROFIBUS 现场总线传递给交流站控系统主机,在其内部由本文描述的策略进行判断,然后将最后断路器的计算结果通过控制总线、以太网发送给换流阀保护系统主机、极控

系统主机、运行人员工作站处理。在特殊情况下一旦有严重系统故障产生,即判断最后一个断路器中一个断路器即将分断,系统立即发出紧急停运连锁信号(ESOF),紧急停运阀组。同时极控系统会通过快速站间通信将 ESOF 信号发送到对站,对站也采取分断相应最后断路器,停运对应阀组等一系列紧急停运操作。

5 结语

针对以往高压直流工程中最后断路器判断逻辑复杂,并可能存在安全隐患的问题,本文提出了一种基于图论的最后断路器自适应判断策略。当交流场输入线路和阀组的数量、接入位置发生变化时,无需修改原来复杂的控制保护程序逻辑,无需控制系统停电更新程序,只需在线修改简单的配置参数,系统即可通过实时采集当前交流场断路器的分合状态,快速、智能、准确地计算出所有输入线路到各个换流阀之间的最后断路器。该策略目前已经应用到南方电网观音岩±500 kV 高压直流输电工程中,有效避免了各种操作风险,对系统安全稳定运行起到十分重要的作用。同时,本文是图论在实际工程问题上的一个典型应用,可为其他类似的工程问题提供借鉴。

参考文献

- [1] 汲广,刘茂涛,张志朝,等.±800 kV 云广工程逆变器站阀组最后断路器保护逻辑改进分析[J].电力系统自动化,2013,37(4):130-133.
JI Guang, LIU Maotao, ZHANG Zhichao, et al. Improvement on last breaker protection logic for valve group in inverter station of ±800 kV Yun-Guang DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 130-133.
- [2] 王华伟,蒋卫平,吴娅妮.云广±800 kV 特高压直流工程逆变器站最后断路器跳闸故障研究[J].电网技术,2008,32(18):6-9.
WANG Huawei, JIANG Weiping, WU Yani. Study on last break trip fault of inverter station in ±800 kV UHVDC project from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 6-9.
- [3] 许卫刚,张志宏,单哲,等.特高压直流与常规直流工程最后断路器保护浅析[J].江苏电机工程,2010,29(5):6-10.
XU Weigang, ZHANG Zhihong, SHAN Zhe, et al. Analysis of the last breaker protection in UHVDC and conventional HVDC projects[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(5): 6-10.
- [4] 江一,夏拥.深圳换流站最后断路器及线路保护的改进建议[J].南方电网技术,2009,3(1):69-71.
JIANG Yi, XIA Yong. Suggestions to improve the last circuit breaker and line protection at Shenzhen converter station[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 69-71.
- [5] 张婷,蒲永红.高压直流输电系统两种最后断路器跳闸保护比较[J].上海工程技术大学,2011,25(2):151-153.
ZHANG Ting, PU Yonghong. Comparison between two kinds of last breaker trip protection in HVDC system[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(2): 151-153.
- [6] 苗世洪,马帅,尚亚男,等.基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J].电力系统自动化,2014,38(2):39-45. DOI: 10.7500/AEPS20130608013.
MIAO Shihong, MA Shuai, SHANG Yanan, et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 39-45. DOI: 10.7500/AEPS20130608013.
- [7] 周德才,张保会,姚峰,等.基于图论的输电断面快速搜索[J].中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.
ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.
- [8] 刘兵,李勇,奚江惠,等.3/2 接线变电站拉停断路器短路电流限制措施分析[J].电力系统自动化,2014,38(12):131-135. DOI: 10.7500/AEPS20131025001.
LIU Bing, LI Yong, XI Jianghui, et al. Analysis of pulling switch to limit short-circuit current in 3/2 wiring substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 131-135. DOI: 10.7500/AEPS20131025001.
- [9] 唐晓勇,侯亚梅.3/2 断路器接线的运行分析及保护配置[J].电力建设,2006,27(1):34-42.
TANG Xiaoyong, HOU Yamei. Analysis on operation of wiring of 3/2 circuit breaker and its protection configuration[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(1): 34-42.
- [10] 倪程捷,房鑫炎,赵文恺,等.基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索[J].电力系统自动化,2015,39(6):34-40. DOI:10.7500/AEPS20140626001.
NI Chengjie, FANG Xinyan, ZHAO Wenkai, et al. Island partitioning and optimal connecting point search of mobile emergency power source based on graph theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 34-40. DOI: 10.7500/AEPS20140626001.
- [11] 张旭,程雪婷,赵冬梅,等.一种基于顶点分裂的电网在线故障恢复路径搜索方法[J].电力系统自动化,2014,38(10):71-77. DOI:10.7500/AEPS20131104018.
ZHANG Xu, CHENG Xueting, ZHAO Dongmei, et al. A path searching method based on vertex splitting for online power grid fault restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 71-77. DOI: 10.7500/AEPS20131104018.
- [12] 梅义,丘东元,张波.基于深度优先搜索的潜在电路计算机辅助分析法[J].中国电机工程学报,2008,28(24):75-81.
MEI Yi, QIU Dongyuan, ZHANG Bo. Computer-aided sneak circuit analysis method based on depth-first search algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 75-81.

于海(1982—),男,通信作者,工程师,主要研究方向:高压直流输电控制与保护设备软件平台研发。E-mail: yuhai_xj@163.com

曾丽丽(1975—),女,高级工程师,主要研究方向:高压

直流输电控制与保护设备软件平台研发。

输电控制与保护设备软件平台研发。

杨亚璞(1979—),男,工程师,主要研究方向:高压直流

(编辑 郑颖)

Self-adaptive Strategy for the Last Breaker in UHVDC Project Based on Graph Theory

YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, DAI Guoan, LI Yanlong, ZHANG Ailing

(XJ Electric Co. Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract : A self-adaptive strategy for the last breaker in UHVDC project based on graph theory is put forward. An equivalent model of the AC field and a solving model of the last breaker based on graph theory are set up. With the AC field abstracted as an undirected connected graph, the breaker as the edge of the graph, AC line, converter and other equipments as the nodes of the graph, the solving problem of the last breaker is converted to a cut edge calculation problem of the undirected connected graph, making the process of last breaker calculation fast, accurate and intelligent. The implementation of the strategy in a project is expected to have great significance for the stable operation of the power grid.

Key words : ultra-high voltage direct current (UHVDC); last breaker; self-adaptive strategy; graph theory

(上接第 114 页 continued from page 114)

Constant-voltage Inductively Coupled Power Transfer System with Wide Load Range Based on Variable Structure Mode

SUN Yue^{1,2}, ZHANG Huan², TAO Wei², MA Junhao², LI Lu², XIA Jinfeng²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China ;

2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : To solve the problem of unstable output voltage of inductively coupled power transfer system (ICPT) subject to disturbance or great load changes, the energy and efficiency of two different compensation topology structures are studied. The output voltage, output power, output efficiency, frequency stability, and load adaptability of the parallel-series (PS) topology and the series-series (SS) topology are also dealt with. Based on the variable structure mode, the method employing different topologies for different loads is given. The switching prerequisite is analyzed in detail and the methods of ensuring safety and effectiveness of switching are recommended. In order to validate the effectiveness of the variable structure mode, two greatly different loads are adopted with their output voltage measured in voltage and current mode ICPT system, respectively. The results show that the variable structure mode is suitable for constant-voltage ICPT system whose load is greatly changed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277192).

Key words : wireless power transmission; variable structure mode ; parallel-series (PS) topology; series-series (SS) topology; resistance with wide load range; constant-voltage output

