电 力 系 统 自 动 化
Automation of Electric Power Systems

有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法

李振兴，尹项根，张 哲，何志勤
（华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室，湖北省武汉市 430074）

摘要： 对于结构复杂的实际大电网，合理的保护分区是基于集中式结构的广域继电保护工程应用中需要重点解决的关键技术之一。文中基于广域继电保护的有限性概念，论述了广域继电保护系统的分区原则，涵盖变电站中心站的选取、有限广域继电保护范围、边界区域的交互等基本分区原则，满足每条线路在至少一个分区内能实现远后备保护，同时，广域区域内保护分区数目达到最少。将图论技术应用于广域继电保护系统分区的实现，提出基于 4 级邻接矩阵的搜索方法，原理简单，运算方便，易于实现。IEEE 10 机 39 节点系统的仿真结果验证了该保护分区原则与实现方法的可行性。

关键词： 广域继电保护；有限性；分区；交互；图论

0 引言

近年来，广域测量系统的不断发展和应用，为解决传统基于就地信息的后备保护整定配合困难和大电网潮流转移问题带来了契机。为了提高继电保护系统的性能，人们提出了广域保护的概念并进行了初步的研究[1-3]。根据国际大电网会议（CIGRE）对广域保护功能的描述，其研究可分为 2 个方面：一是基于广域信息的电网安全稳定控制研究，主要对电网的安全稳定运行状态进行监测、分析和评估；二是集中于利用广域信息改进和提高传统继电保护的性能，在这方面，国内外学者就广域继电保护原理研究与系统构成进行了大量论述。广域后备保护根据所基于的系统结构不同，可分为集中式、分布式 2 类。由于系统结构的不同，相同的算法在实现过程中也有所差别。

目前的研究主要是基于电力系统主保护算法的拓展，将方向比较纵联保护和电流差动保护原理引申到广域后备保护中，并结合智能算法提高信息的容错性[4-6]。不论是系统结构还是故障定位算法研究，均是集中在有限区域的基础上进行讨论，而缺乏详细的区域划分讨论。尽管部分文献也说明了分区[7]，但都缺乏一定的系统性研究和整体的配合研究，没有形成一定的分区原则，与常规保护的保护范围相脱节。

本文从广域继电保护集中式系统结构出发，提出了复杂大电网广域继电保护的有限性概念。基于有限性的思想，着重研究了全电网的广域继电保护系统分区问题，提出了广域继电保护系统分区的原则，并提出基于图论技术的广域继电保护系统分区的实现方法。

1 广域继电保护的有限性概念

广域继电保护的核心思想在于通过电网中广域同步测量信息，通过信息融合计算确定故障元件的具体位置，在相邻保护之间通过简单的时序配合来保证保护动作的正确性。应用于实际电网的广域继电保护应从工程化实际应用和保护对象后备保护展开研究，广域继电保护为实现保护对象的后备保护功能，仅要求获取与该对象相关联的有限广域故障信息，不需要极大广域内的所有信息。基于有限广域的概念，体现在以下几个方面：

1）主要考虑加强电网“第一道防线”性能，体现承担任务的有限性。

2）为实现保护对象的后备保护功能，避免常规后备保护整定配合困难问题，要求获取与保护对象相关联的有限广域的相关信息，但同时，继电保护后备保护的范围又确定了所需信息范围是有限的。

3）广域继电保护的实现是逐步发展的过程，将全电网划分为由各个有限区域共同组成，是电网长期建设的自然发展结果，有利于系统的过程实现。

基于广域继电保护有限性的思想，有 2 个主要方面的问题需要研究：一是全电网的广域继电保护系统分区问题；二是有限区域内广域继电保护的系统构成及保护实现问题。本文着重研究了广域继电保护系统分区问题，为系统构成和保护实现奠定了基础。

收稿日期：2010-05-30；修回日期：2010-07-08。
国家自然科学基金资助项目（50877031，50837002）。

2　广域继电保护系统分区原则

广域继电保护系统分区是构成有限广域继电保护系统的重要环节之一，直观体现了系统空间、保护范围的有限性，也是制订保护算法和保护跳闸策略的重要依据。

2.1　中心站选取原则

有限广域继电保护系统的集中式结构要求在有限区域内选取一个变电站和发电厂作为广域继电保护系统的决策中心站，区域内其他变电站和发电厂作为子站，也可作为备用中心站。中心站的选取既要考虑输电系统节点之间的连接关系，也要考虑节点间通信系统的连接关系。一般优先考虑人员、地理环境和通信条件等因素，指定一些特殊的变电站或发电厂作为中心站；其次是选取相邻节点多、路径关联密集的变电站作为中心站。考虑到决策中心的安全可靠性，一般集中式系统结构还会在区域内选取一个备用中心站，在中心站因特殊情况不能正常工作时能够起到中心站热备用站的作用，一般选取相邻节点较多、路径关联较密集的变电站作为备用中心站。

为了减小广域继电保护系统分区的数量，选取的任意2个中心站应尽量不是直接相邻的变电站或发电厂。考虑广域继电保护系统能够实现常规远后备保护的保护范围，以中心站为起始点，保护范围要能够达到下一条线路的末端，如果2个中心站是直接相邻站，则2个区域的交互区过大，将使得整个系统因此划分出太多的区域。

2.2　有限广域继电保护系统的保护范围

广域继电保护系统作为被保护对象的后备保护，即在功能上能够实现常规近后备和远后备保护的保护功能，要求电力系统中各保护对象（指常规保护中配备远后备保护的元件）在广域继电保护系统中也能够实现该功能。因此，广域继电保护系统的保护范围以满足各保护对象的远后备保护范围为原则，即以中心站为起始点，保护范围能达到下一条线路的末端。

2.3　边界优先分区原则

电网建设是一个长期的发展工程，在广域继电保护系统分区时需要考虑电网规划的发电厂、变电站等规划节点，在电网的有限分区后增加新的节点时尽量能够满足广域继电保护系统结构的要求，不至于重新划分区域。

众所周知，电力系统是一个发电、输电、用电的过程。发电和用电是整个系统的起点和终点，尽管输电系统易受到系统扰动，出现运行方式变化甚至解列，但起点和终点基本上变化较小。所以在广域继电保护系统分区时，应优先从系统边界，即起点和终点开始进行区域划分。

2.4　区域交互原则

图1给出4种不同区域的交互情况。图1(a)中变电站 V_2 得不到保护；图1(b)中在线路 L_2 故障时不能由 V_2 实现 L_2 的远后备功能。同时，以上2种情况在变电站 V_2 直流消失时，变电站 V_2、线路 L_1、线路 L_2 均不能够得到有效的保护。图1(c)中由于交互区包含一条线路，避免了上述2种情况的缺点，但线路 L_2 的远后备由2个不同区域完成。图1(d)由于交互区包含2条线路及中间变电站，不存在上述3种情况的问题，但交互区域过大使得系统通信量增加。因此，从上述分析可知，广域继电保护系统的2个相邻区域必须交互至少1条线路，必要时应该交互更多，才能够避免该线路相邻变电站仅作为1个或多个保护区域边界时，在变电站直流消失、断路器失灵等情况下，广域继电保护因信息缺失不能够快速切除故障的问题。

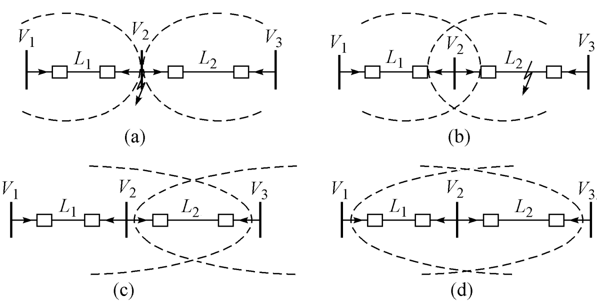

图1　交互分区
Fig. 1　Interactive division area

实际电网是逐渐发展建设的过程，在工程应用背景下讨论保护分区，还需要考虑系统规划、调度、运行方式、保护、通信等设计和运行人员的经验对保护分区的特定要求，如未来规划的变电站等，并对保护分区结果进行适当调整，使其更具有工程应用价值。

3　基于图论的矩阵分析方法

图论作为拓扑学的一个分支，其研究及应用在各个领域都得到了迅速发展，应用于有限广域系统能够为系统实现广域保护分区与保护算法等决策时提供理论依据和数学描述[8-9]。

本文遵照广域继电保护系统分区原则，结合图论的基本理论，基于矩阵的简单运算，实现广域继电保护系统分区方法。

以图2所示的IEEE 11节点网络为例说明广域继电保护系统分区方法。在电网形成的网络拓扑图中，定义母线、线路等被保护元件为图论节点，如

$V_1, V_2, \cdots, V_n$；定义线路电流互感器及断路器为图论支路，如 $e_1, e_2, \cdots$。

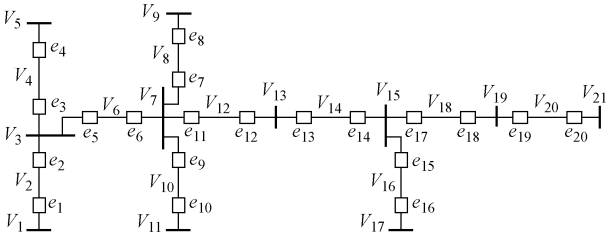

图 2　IEEE 11 节点系统
Fig. 2　IEEE 11-bus system

用 $n \times n$ 阶的矩阵 $\boldsymbol{C}$ 表示图论节点的邻接矩阵，定义如下：

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 邻接节点 } j \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 不邻接节点 } j \end{cases}$$

按照图 2 系统写出邻接矩阵 $\boldsymbol{C}$ 如附录 A 所示。

本文引用多级邻接矩阵表示电网节点之间的间接影响关系，定义如下：

$$P_{ij}^{m} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 通过 } m \text{ 级邻接节点 } j \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 通过 } m \text{ 级不邻接节点 } j \end{cases}$$

式中：m 为级数。

m 级邻接矩阵与邻接矩阵 $\boldsymbol{C}$ 之间存在如下的逻辑运算关系：

$$\boldsymbol{P}^m = \boldsymbol{C}_1 \cup \boldsymbol{C}_1^2 \cup \cdots \cup \boldsymbol{C}_1^m$$

根据保护分区原则，广域继电保护系统的保护范围以中心站为起始点，保护范围达到下一条线路的末端，计及图论描述中母线、线路均为图论节点，则保护范围为 4 个图论节点长度，因此在分区计算时，多级邻接矩阵设定 $m=4$。按照图 2 系统计算 4 级邻接矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 为：

$$\boldsymbol{P}^4 = \begin{array}{l}
\begin{array}{ccccccccccccccccccccc} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 & V_7 & V_8 & V_9 & V_{10} & V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} & V_{17} & V_{18} & V_{19} & V_{20} & V_{21} \end{array} \\
\left[\begin{array}{ccccccccccccccccccccc}
1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0\\
0&1&1&1&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&1&1&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&1&1&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&1&0&0&0\\
0&0&1&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0\\
0&0&0&0&0&1&1&1&0&1&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&0&1&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&0&1&1&1&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&1&1&1&1
\end{array}\right]
\begin{array}{c} V_1\\V_2\\V_3\\V_4\\V_5\\V_6\\V_7\\V_8\\V_9\\V_{10}\\V_{11}\\V_{12}\\V_{13}\\V_{14}\\V_{15}\\V_{16}\\V_{17}\\V_{18}\\V_{19}\\V_{20}\\V_{21} \end{array}
\end{array}$$

基于保护分区原则，在 4 级邻接矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中运行系统分区搜索程序，可得广域继电保护系统最终的分区结果，其流程如下：

步骤 1：搜索有无指定的中心站。如果有，则分别以各中心站为中心，以保护范围为有效半径（即 4 节点长度）划分保护分区，即在矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中搜索指定中心站节点对应的行，该行所有元素为 1 的列节点集合即为该中心站对应广域继电保护系统的保护区域。

步骤 2：检查已划分的保护分区结果是否包含矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中的所有节点，如果没有，则首先按照边界优先分区原则搜索边界节点，并在矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中分别搜索边界节点对应的列，然后计算该列元素为 1 的行的顶点度（即该行所有元素的和），最大顶点度值对应的节点初步设为该边界节点选取的中心站。

步骤 3：优化调整中心站。比较步骤 2 选取的

中心站,首先将多边界节点选取的同一中心站进行节点合并,然后在矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中搜索各中心站节点对应的行,对该行所有元素为 1 的列节点进行识别,如果列节点中包含边界站,则按照中心站选取原则选取其中的一个节点作为中心站,另外一个节点作为一般节点。搜索完成后的各中心站则认为是最优中心站。同理,在矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中搜索该中心站节点对应的行,该行所有元素为 1 的列节点集合即为该中心站对应的广域继电保护系统的保护区域。

步骤 4:检查已划分的保护分区结果是否符合区域交互原则,如果不符合,则将未交互节点向已划分保护区域方向延伸 2 个节点长度至母线节点,并以该母线节点作为边界节点,按照步骤 2、步骤 3 的方法进行保护分区。依次循环步骤 1～步骤 3,直至分区完成。

步骤 5:针对完成的各个保护分区,分别在矩阵 $\boldsymbol{P}^4$ 中搜索中心站节点对应的列,然后计算该列元素为 1 的所有行的顶点度,最大顶点度值对应的变电站节点(如果该节点为中心站节点,则取次最大顶点度值对应的变电站节点;对于相同顶点度大小的节点,则优先选取非交互区域的变电站节点)设为备用中心站。

基于以上方法,将图 2 所示系统分成 2 个保护区域:

1)区域 G1:节点集合 $V=(V_1,V_2,V_3,V_4,V_5,V_6,V_7,V_8,V_9,V_{10},V_{11},V_{12},V_{13},V_{14},V_{15})$,中心站 V_7,备用站 V_3;

2)区域 G2:节点集合 $V=(V_7,V_{12},V_{13},V_{14},V_{15},V_{16},V_{17},V_{18},V_{19},V_{20},V_{21})$,中心站 V_{15},备用站 V_9。

2 个区域的交互节点为(V_{12},V_{13},V_{14}),如图 3 所示。

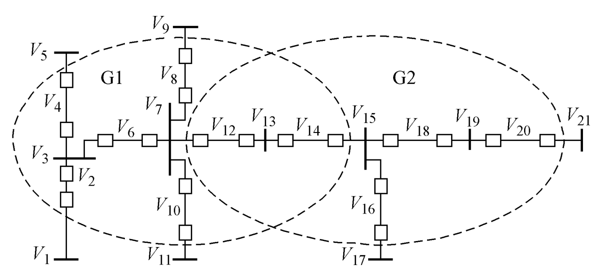

图 3 广域继电保护系统的分区区域
Fig. 3 Division area of wide area protection system

4 算例仿真

为验证本文分区方法,利用 IEEE 10 机 39 节点电网系统模型进行仿真分区验证。仿真系统的单线图及其支路编号如附录 B 所示。

由于广域继电保护系统分区不考虑发电机组和母线的负荷出线,故在附录 B 所示系统的分区过程中不体现发电机和负荷部分。

率先指定联络线较多的节点 B_{16} 为中心站,按照分区方法首先分出区域 G1(中心站节点为 B_{16};中心站邻接变电站节点为 B_{15},B_{17},B_{19},B_{21},B_{24};边界站节点为 B_{14},B_{18},B_{20},B_{22},B_{23},B_{27})。其次搜索最优起始边界站,得到边界节点 B_{30},B_{31},B_{32},B_{33},B_{34},B_{36},B_{37},B_{38},分别在 4 级邻接矩阵中进行广域继电保护系统分区,得到相应的中心站节点 B_{25},B_6,B_{13},B_{19},B_{22},B_{26},但在分区优化检验时检测到节点 B_{16} 与 B_{19},节点 B_{25} 与 B_{26} 为相邻变电站节点,同时节点 B_1 不能够满足交互原则,所以将中心站节点 B_{19} 修正为节点 B_{20},中心站节点 B_{25} 修正为节点 B_1。再搜索未实现保护分区的节点,选择节点 B_3 和 B_9 为中心站并进行分区,最终通过检验交互原则,并得到 9 个保护分区结果,如图 4 所示。

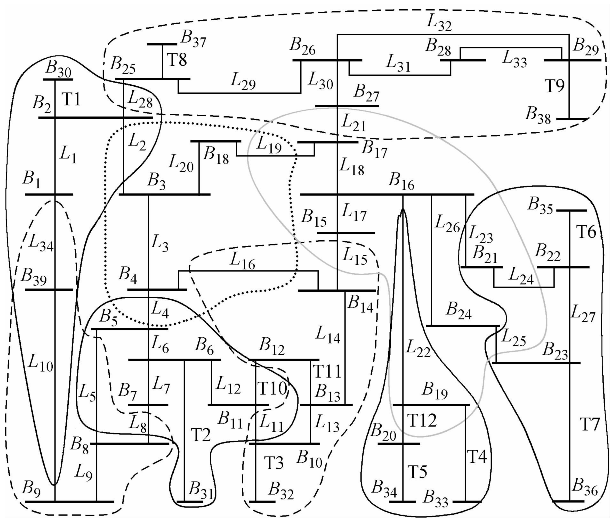

图 4 IEEE 10 机 39 节点系统保护分区
Fig. 4 Division area of IEEE 10-machine 39-bus system

5 结论

1)基于结构复杂的实际大型电网,为推动广域继电保护的工程实际应用,提出了有限性的概念,说明了保护分区的必要性。

2)提出了广域继电保护系统的分区原则:变电站中心站的选取原则、有限广域继电保护范围、边界优先分区原则和边界区域交互原则。

3)提出了基于图论技术的广域继电保护系统分区方法,原理简单,运算方便,易于实现。算例分析验证了保护分区原则与实现方法的可行性。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御.电力系统自动化,2006,30(1):1-9.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part one from isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-9.

[2] 张保会,姚峰,周德才,等.输电断面安全性保护及其关键技术研究.中国电机工程学报,2006,26(21):1-7.
ZHANG Baohui, YAO Feng, ZHOU Decai, et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.

[3] ADAMIAK M G, APOSTOLOV A P, BEGOVIC M M, et al. Wide area protection-technology and infrastructures. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.

[4] 汪旸,尹项根,张哲.分布式集中决策的区域智能保护系统结构与算法.电力系统自动化,2009,33(21):31-35.
WANG Yang, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. The research of regional intelligent protection based on genetic algorithm. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 31-35.

[5] 苗世洪,刘沛,林湘宁,等.基于数据网的新型广域后备保护系统实现.电力系统自动化,2008,32(10):32-36.
MIAO Shihong, LIU Pei, LIN Xiangning, et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36.

[6] 丛伟,潘贞存,赵建国,等.基于电流差动原理的广域继电保护系统.电网技术,2006,30(5):91-95.
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo, et al. A wide area relaying protection system based on current differential protection principle. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95.

[7] 丛伟,潘贞存,赵建国.基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究.中国电机工程学报,2006,26(21):8-14.
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.

[8] NAMDARI F, JAMALI S, CROSSLEY P A. Power differential based wide area protection. Electric Power Systems Research, 2007, 77(12): 1541-1551.

[9] 汪旸,尹项根,赵逸君,等.基于遗传算法的区域电网智能保护.电力系统自动化,2008,32(17):40-44.
WANG Yang, YIN Xianggen, ZHAO Yijun, et al. Regional power network intelligent protection based on genetic algorithm. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 40-44.

李振兴(1977—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护与控制、电力系统人工智能技术。E-mail: lzx2007001@163.com

尹项根(1954—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护、变电站自动化及安全稳定控制。

张　哲(1962—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护及自动控制。

Zone Division and Implementation on Limited Wide Area Protection System

LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, HE Zhiqing

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For an actual large-scale complex grid, rational protection zone division based on wide area relaying engineering applications with centralized structure is one of the key technologies to be tackled. Based on the concept of limitedness of wide area relaying, the principles of protection zone division are discussed, including the selection of the main station, the limited scope of wide area protection, and the basic principles of border region interaction. Each of the lines should be capable of realizing back-up protection in at least one divided area while the number of protected zones in the wide area network should reach the minimum. The graph theory is employed to realize wide area protection system partition and the search method based on 4-level adjacent matrix is proposed, which is simple in principle, convenient to operate, and easy to implement. The simulation results concerning an IEEE 10-machine 39-bus system show the feasibility of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877031, No. 50837002).

Key words: wide area protection; limitedness; zone division; interaction; graph theory

附录 A

$$
C=\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccccccccccccccccccc} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 & V_7 & V_8 & V_9 & V_{10} & V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} & V_{17} & V_{18} & V_{19} & V_{20} & V_{21} \end{array} \\
\left[\begin{array}{ccccccccccccccccccccc}
0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&1&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0
\end{array}\right]
\end{array}
\begin{array}{c} \\ V_1\\ V_2\\ V_3\\ V_4\\ V_5\\ V_6\\ V_7\\ V_8\\ V_9\\ V_{10}\\ V_{11}\\ V_{12}\\ V_{13}\\ V_{14}\\ V_{15}\\ V_{16}\\ V_{17}\\ V_{18}\\ V_{19}\\ V_{20}\\ V_{21} \end{array}
$$

附录 B

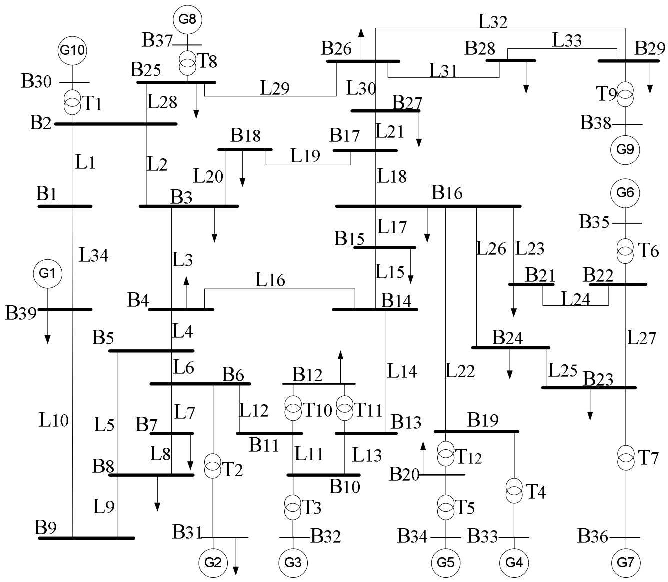

图 B1　IEEE 10 机 39 节点系统

Fig.B1　IEEE 10-machine-39-bus system