

IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用

于坤山¹, 谢立军², 金锐¹

(1. 全球能源互联网研究院电工新材料及微电子研究所, 北京市 102211; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 近十年来,高电压、大功率绝缘栅双极型晶体管(IGBT)技术逐渐成熟,并在直流输电系统中得到广泛应用。文中首先介绍了 IGBT 的发展和改进,总结了 IGBT 发展的重要阶段。其次,介绍了基于 IGBT 的柔性直流输电换流阀的典型拓扑,并说明 IGBT 在拓扑内的应用参数及特点。最后给出了 IGBT 为适应柔性直流输电技术在性能、封装形式及材料等方面的发展趋势。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管(IGBT); 柔性直流输电; 换流阀; 典型拓扑

0 引言

近十年来,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)从芯片设计、工艺、测试到器件封装技术等方面都取得了重大进步,器件的参数和整体性能得到显著提高。目前,IGBT 最高水平达到 6 500 V/650 A 和 3 300 V/2 000 A。实验室电压、电流水平更是分别达到 8 000 V 和 3 800 A。各类采用 IGBT 的电力电子装置也从实验示范实现了规模化和产业化。

随着中国电网发展,特别是以风电和太阳能发电为代表的可再生能源的快速发展,极大地推动电网新技术的应用规模和发展进程。以柔性直流输电为代表的新一代输电技术,将成为促进 IGBT 在电力系统中应用加速的首要驱动力,高压、大容量、低损耗、安全工作区域大将成为 IGBT 主要发展方向。提高 IGBT 的容量,需要解决由于电压电流提升给 IGBT 芯片制造及封装带来的难题,目前国内的主要器件生产厂家针对高压大电流等级的 IGBT 都正在开展研发,有望在未来几年内投入商业使用,以期实现 IGBT 国产化。

1 IGBT 技术发展演进

IGBT 自 20 世纪 80 年代发明以来,其表面结构(金属氧化物半导体(MOS))和体结构(耐压层和集电区)都经历了一系列的相对独立的发展和改进。从表面 MOS 结构上讲,主要经历了从平面栅到沟

槽栅的改进,以及由简单 P 阱向 N 阱包围 P 阱形成空穴阻挡层的演变,如图 1 所示。图中, E 和 G 分别为 IGBT 的发射极和栅极。

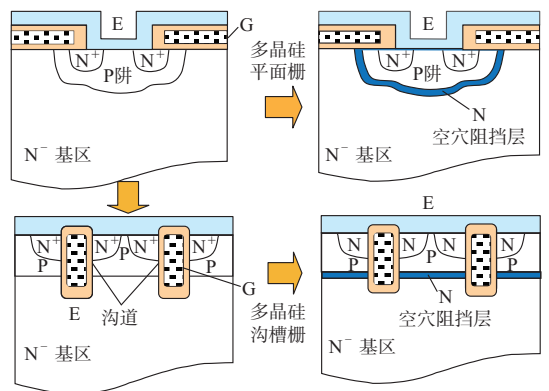


图 1 IGBT 表面结构的演化
Fig.1 Evolution of IGBT surface structure

槽栅结构借鉴了大规模集成电路(LSI)工艺中的硅干法刻蚀技术,实现了在通态电压和关断时间之间的优化。元胞结构则采用了更先进的宽元胞间距的设计及空穴阻挡层。典型的例子包括日立半导体的 HiGT、三菱半导体的 CSTBT 芯片和 ABB 公司的 EP 工艺等技术。

从体结构上讲,IGBT 经历了由非透明集电区穿通型 IGBT (PT-IGBT) 到透明集电区非穿通 IGBT (NPT-IGBT),再到透明集电区 PT-IGBT 的演变,如图 2 所示。图中, C 为 IGBT 集电极。

穿通技术载流子注入系数较高,但由于它要求对少数载流子寿命进行控制,致使其运输效率变坏;非穿通技术无需对少数载流子寿命进行杀伤就可有很好的运输效率,但载流子注入系数比较低。因此非穿通技术被新的含有缓冲层的新型体结构所代

收稿日期: 2015-02-09; 修回日期: 2015-09-24。

上网日期: 2015-11-02。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2014AA052601); 国家电网公司科技项目(SGRI-WD-71-13-006, SGRI-WD-71-14-005)。

替。这种 IGBT 现在被不同的供应商命名,如英飞凌公司命名其为场中止 IGBT(FS-IGBT),ABB 公司命名其为软穿通(SPT),但其基本原理是一致的。目前,科学家又在开展具有“反向阻断型”(逆阻型)功能或具有“反向导通型”(逆导型)功能的新概念 IGBT 的研究,以使 IGBT 的性能进一步优化。IGBT 发展历程中的重要成果如附录 A 表 A1 所示^[1-2]。

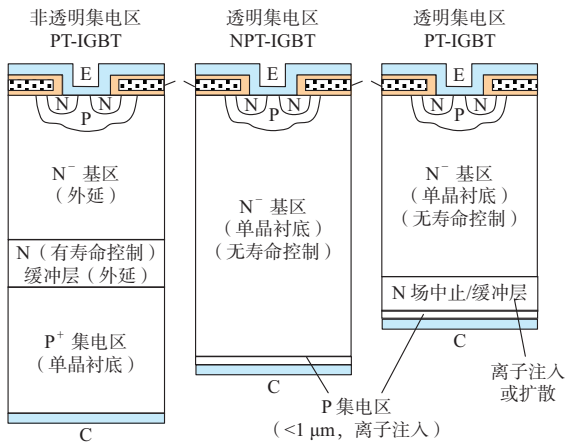


图2 IGBT 体结构的演化

Fig.2 Evolution of IGBT body structure

结合图 2 和附录 A 表 A1 可以看出,目前国外 IGBT 技术已经从 PT,NPT 发展至第三代 FS-PT,比较成熟,且根据不同的应用推出电压等级在 600~6 500 V 的分立器件及模块。

近年来,国内 IGBT 科研与产业化有了飞速的发展^[3-4]。特别是用于电磁炉、家用电器等的小功率 IGBT 已开始量产。1 200 V 及以上电压等级的大功率 IGBT 的研究和试用也有了较大的进展。如用于变频焊机的 1 200 V IGBT 已开始试用^[3-4]。特别是,原中国北车从 ABB 引进封装线,具有封装 1 200~6 500 V 的 IGBT 模块的能力;原中国南车成功收购英国丹尼斯公司,并投产 8 英寸(20.32 cm)IGBT 芯片生产线;国家电网公司全球能源互联网研究院已成功研制出 1 200,1 700 和 3 300 V 系列化 IGBT 芯片并开展面向智能电网应用的封装技术研究。可以预见,高电压、大功率 IGBT 器件及其应用核心技术的完全国产化指日可待。

2 IGBT 在柔性直流输电中的应用

随着 IGBT 的快速发展,大大推动了直流输电的发展,出现了以电压源换流器(VSC)和 IGBT 为基础的柔性直流输电技术。柔性直流输电技术可用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、大

型城市电网供电等方面^[5-6]。特别是在风力发电并网、海上平台供电和大型城市电网供电方面,柔性直流输电系统的综合优势更加明显。国家能源局指出,“十二五”期间要重点解决大型风电等可再生能源基地并网的瓶颈问题。为解决新能源并网问题,世界各国进行了多种尝试。专家表示,柔性直流输电是保证新能源接入的最好方式之一^[7]。

2006 年,国内开始研发柔性直流输电系统;2011 年,中国自主研发的上海南汇风电场柔性直流输电工程投入运行;2013 年,南澳多端柔性直流输电工程投入运行,舟山多端柔性直流输电工程即将运行。柔性直流输电技术凭借其优异的技术特点大有替传统直流之势,成为未来直流输电的发展方向,目前正朝着更高电压、更大容量、多端化、网络化方向发展。而作为柔性输电的核心设备,高压大功率电压源型换流阀目前有 3 种拓扑:基于 IGBT 器件直接串联的电压源型换流阀、基于换流单元串联的模块化多电平电压源型换流阀和基于压接型 IGBT 器件串联与换流单元串联相结合的电压源型换流阀^[8-10]。IGBT 在不同换流阀拓扑中的应用及不同拓扑对 IGBT 特性的需求如下。

1) 两电平

两电平电压源换流器采取串联压接式 IGBT 如图 3 所示,具有结构简单、易于工程实施与组装的优点,同时结构上的简洁也带来整体系统可靠性的提高,两电平电路拓扑是最常见的电路拓扑结构。但是,由于直流侧电压较高,需要多个 IGBT 串联,对 IGBT 模块串联均压提出了考验,因此要求 IGBT 参数一致性好,保证模块的串联均压。同时,为降低器件串联难度,对器件耐压水平也提出了较高要求。此外,压接式封装的短路模式更利于器件串联。

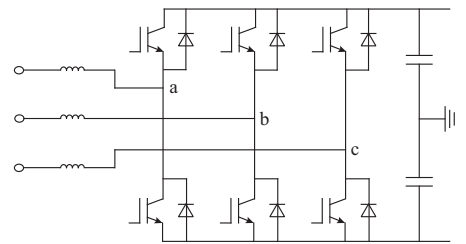


图3 两电平电路拓扑

Fig.3 Topology of two-level circuit

2) 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器(MMC)是通过一系列结构相同的子单元 SM(半桥或全桥形式)级联而成的,如图 4 所示。与基于 IGBT 串联阀的两电平或三电平换流器相比,MMC 避开了 IGBT 串联动态均压控制的难点,其具有模块化特性,易于扩展电

压、容量,开关频率与损耗较低。因此,在 MMC 拓扑中,宜采用低通态损耗的 IGBT 芯片。上海南汇柔性直流输电示范工程两端换流站均采用 49 电平模块化多电平拓扑结构^[11],该拓扑已经在工业界取得了较高的认可度。但是其开关器件数目增加一倍(全桥增加两倍),控制系统复杂性大幅提高,同时子模块电容电压间的平衡控制也较难^[9-10]。

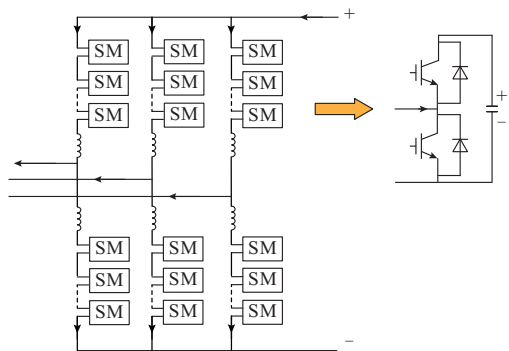


图 4 MMC 电路拓扑
Fig.4 Topology of MMC

3) 级联两电平

2010 年 ABB 公司提出了一种新的多电平电压源换流器拓扑——级联两电平(CTL),其典型拓扑如图 5 所示。其核心思路为:①使用压接式的具有短路失效模式的 IGBT 以提高子模块可靠性、简化子模块硬件设计;②使 IGBT 阀级控制较简单。级联两电平 VSC 结合了模块化多电平技术和 IGBT 串联技术,具有模块化特性,易于扩展电压和容量,开关频率低,损耗小,电平数少,控制保护系统简单,尤其适用于更高电压等级(± 320 kV)且更大容量的柔性直流输电应用场合。

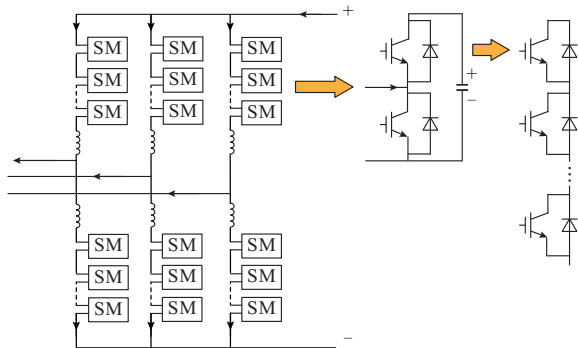


图 5 CTL 电路拓扑
Fig.5 Topology of CTL

3 IGBT 未来发展

随着大规模新能源发电与并网技术、大规模储能技术、超远距离超大规模输电技术的发展,对柔性

直流输电装备的电压、功率容量和可靠性提出了更高的要求。为适应未来直流电网发展,其对 IGBT 提出了更高电压和更大容量的需求。未来 IGBT 还将在现有最高电压(6 500 V)和电流(2 000 A)的基础上,向更高电压(8 000 V)和电流(3 000 A 至 4 000 A)的方向发展。同时,封装形式上,还要适应高电压、大电流的需要,并进行创新^[7]。

为满足未来电网的需求,科研人员将对 IGBT 的结构、工艺、封装不断进行探索,预计将呈现以下几个方面的发展趋势。

1) 新结构的探索。在 P 集电区内合理设置 N 型短路点,结合局域寿命控制或 P 阱掺杂优化,形成内集成快恢复反并联二极管,从而制造出逆导 IGBT(RC-IGBT)或双模式 IGBT(BiGT),使其在给定的封装尺寸内实现更大的电流容量和功率容量。

2) 半超结 IGBT 的探索。半超结是超结结构的一种变化,通过对 P 注、N 注(二者掺杂浓度可高出常规 N⁻层两个数量级)和 N⁻区的合理配置,宇宙射线诱发失效率可以有 1 至 2 个数量级的降低。同时,该结构还可以抗动态雪崩,改善通态压降和关断损耗,并且其所需工艺技术并不困难。此外,将半超结用于逆导 IGBT 结构时,还可以有效地减轻输出特性曲线的回跳(snapback)现象。

3) 更高的工作温度。当前部分器件的最高工作温度已提高到 175 °C。将工作温度提高到 200 °C 的可能性正在探索之中。

4) 更合适的封装形式。目前常见的焊接式 IGBT 模块,这种封装形式采用单面散热,器件的功率发挥受到限制,不易串并联、耐盐雾差、耐振动冲击和热疲劳性能差。新型平板全压接大功率 IGBT 器件不仅彻底解决了焊接工艺易产生空洞、焊接材料的热疲劳和单面散热效率低下的难题,还消除了因各种零部件产生的热阻、减小了体积和重量,大大提高了 IGBT 的工作效率和可靠性,非常适用于未来柔性直流输电系统对换流阀器件的大功率、高电压、高可靠性要求,新型平板全压接大功率 IGBT 器件将在柔性直流输电系统中广泛替代焊接式 IGBT 模块。

另外,新材料的应用也将不断成熟,掺铈缓冲层 IGBT 以及碳化硅 IGBT 将成为未来 IGBT 的重要发展方向,以促使产品更加适应高频、高压以及高功率的应用。目前以碳化硅为代表的宽禁带半导体器件方兴未艾。与传统硅器件相比,碳化硅器件具有如下优势。

1) 碳化硅器件耐压等级高,目前已有 15 kV 的

碳化硅 IGBT 的报道,最高耐压可到 24 kV^[12],这将大大减少直流输电换流阀中器件的串联数量,它可解决 6.5 kV 硅 IGBT 在该应用中存在的串联器件多、效率低和频率低的问题。

2)碳化硅器件具有优异的开关性能,其开关时间只有相同电压等级的同类硅器件的数十分之一,可大大提高器件开关频率。

3)碳化硅器件导通电阻只有硅器件的数十分之一,可大幅度降低导通损耗。

4)碳化硅器件热导率高,具备耐高温特性,目前已报道的最高器件结温可到 300 ℃,能够大幅降低辅助电路及设备的功率损耗,降低冷却需要。

文献[13]中,利用 Silvaco-TCAD 设计了 40 kV 碳化硅晶闸管,并在 6 脉动换流器基础上计算了基于碳化硅晶闸管与硅晶闸管的换流阀损耗。研究结果表明,如果在 ±800 kV,5 000 A 直流工程采用碳化硅晶闸管串联的直流换流阀替代硅换流阀,单级 200 kV 的换流阀需采用 67 只硅晶闸管,而碳化硅器件只需采用 12 只,且系统结构设计和控制设计简单,可靠性高。由于开关速度快,可以降低输出端谐波,减少 37%至 41%的能量损耗。由于发热量小,可以大大降低对冷却设备的要求,减小系统体积,降低工程造价。同样,若在 VSC 中使用碳化硅 IGBT 器件,其损耗大约会降低 40%以上,为柔性直流输电带来巨大的经济效益。此外,文献[14-16]报道了 SiC IGBT 在固态变压器及断路器中的应用,高压 SiC IGBT 技术的突破,有望在高压直流输电的发展中发挥更大作用。

碳化硅 IGBT 在柔性直流输电系统中的应用,相应的其封装材料的耐热和绝缘大幅改进,进而突破器件的容量限制,进一步提高输电容量及适用电压等级,降低输电损耗,为柔性直流输电的应用拓展带来新的机遇^[12,17-18]。

4 结语

IGBT 是目前电力电子领域中,最具有优势的功率器件之一,从问世到现在的二十多年,IGBT 在电压、电流、开关损耗等静态和动态参数指标的不断提高,工艺和可靠性技术的不断成熟,为其在柔性直流输电的应用创造了条件,为系统输送能力的提高、电网运行稳定、新能源并网等提供了可能。除此之外,随着电力系统自身的快速发展和器件技术的进步,科学家提出了“直流电网、直流微网和直流用电”等新概念,而这些新概念的完善和技术实现,需要更加高性能 IGBT 技术的支持。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 叶立剑,邹勉,杨小慧.IGBT 技术发展综述[J].半导体技术,2008,33(11):937-940.
YE Lijian, ZOU Mian, YANG Xiaohui. Review on development of IGBT technology [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(11): 937-940.
- [2] 周文定,亢宝位.不断发展中的 IGBT 技术概述[J].中国集成电路,2009,18(1):23-28.
ZHOU Wending, KANG Baowei. Summary on continuous development of IGBT technology[J]. China Integrated Circuit, 2009, 18(1): 23-28.
- [3] 戚丽娜,张景超,刘利峰,等.IGBT 器件的发展[J].电力电子技术,2012,46(12):34-38.
QI Lina, ZHANG Jingchao, LIU Lifeng, et al. The development of insulated gate bipolar transistor [J]. Power Electronics, 2012, 46(12): 34-38.
- [4] 亢宝位.中国 IGBT 制造业发展、现状与问题的思考[J].智能电网,2013,1(1):1-5.
KANG Baowei. Thinking about the development, present situation and problems of China IGBT manufacturing[J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 1-5.
- [5] 张东辉,冯晓东,孙景强,等.柔性直流输电应用于南方电网的研究[J].南方电网技术,2011,5(2):1-6.
ZHANG Donghui, FENG Xiaodong, SUN Jingqiang, et al. Research of VSC HVDC application to China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 1-6.
- [6] 王熙骏,包海龙,叶军.柔性直流输电技术及其示范工程[J].供用电,2011,2(2):23-26.
WANG Xijun, BAO Hailong, YE Jun, et al. High-voltage DC flexible technology and its demonstration engineering[J]. Power Supply, 2011, 2(2): 23-26.
- [7] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [8] 韦延方,卫志农,孙国强,等.适用于电压源换流器型高压直流输电的模块化多电平换流器最新研究进展[J].高电压技术,2012,38(5):1243-1252.
WEI Yanfang, WEI Zhihong, SUN Guoqiang, et al. New prospects of modular multilevel converter applied to voltage source converter high voltage direct current transmission [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1243-1252.
- [9] 周敏,张劲松,刘宇思.可控电压源型柔性直流输电换流器拓扑综述[C]//中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会,2012年8月21—24日,北京.
- [10] 黄川,王志新,王国强.基于 MMC 的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J].电力自动化设备,2011,31(11):23-27.
HUANG Chuan, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Simulation of MMC-based converter for flexible direct current transmission of offshore wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 23-27.
- [11] 马为民,吴方劼,杨一鸣,等.柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J].高电压技术,2014,40(8):2429-2439.

- MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [12] HINOJOSA M, O'BRIEN H, VAN B E, et al. Solid-state Marx generator with 24 kV 4H-SiC IGBTs [C]// 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), May 31-June 4, 2015, TX, USA: 5p.
- [13] 雷海峰. 基于碳化硅新型换流阀设计研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [14] 赵正平. SiC 新一代电力电子器件的进展 [J]. *半导体技术*, 2013, 38(2): 81-88.
ZHAO Zhengping. Progress of the new generation SiC power electronic devices [J]. *Semiconductor Technology*, 2013, 38(2): 81-88.
- [15] MADHUSOODHANAN S, TRIPATHI A, PATEL D, et al. Solid state transformer and MV grid tie applications enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs based multilevel converters [C]// 2014 International Power Electronics Conference, May 18-21, 2014, Hiroshima, Japan: 8p.
- [16] REZAEI M A, WANF G, HUANG A Q, et al. Static and dynamic characterization of a >13 kV SiC p-ETO device [C]// IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, June 15-19, 2014, Waikoloa, USA: 4p.
- [17] HUANG Q A, BALIGA B J. FREEDM system: role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet [C]// International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, June 14-18, 2009, Barcelona, Spain: 4p.
- [18] JACOBSON D A N, WANG P, KARAWITA C, et al. Planning the next Nelson River HVDC development phase considering LCC vs. VSC technology [C]// 2012 CIGRE Session, August 26-31, 2012, Paris, France.

于坤山(1963—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电能质量及其控制技术、功率微电子器件及其装置技术。
谢立军(1988—),女,通信作者,硕士,主要研究方向:功率电子器件应用。E-mail: liju-xie@163.com
金锐(1982—),女,博士,主要研究方向:电力电子器件。

(编辑 王梦岩)

Recent Development and Application Prospects of IGBT in Flexible HVDC Power System

YU Kunshan¹, XIE Lijun², JIN Rui¹

(1. Department of New Electrical Materials & Microelectronics, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102211, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the recent ten years, the high voltage power device insulated gate bipolar transistor (IGBT) has rapidly developed and found wide application in the HVDC power system. In this article, the development and improvement of IGBTs' performance are described first, with the significant stages of IGBTs; development and tendency in and outside China summarized, and the improvement of performance and packages for IGBT to be used in the application of flexible HVDC are analyzed in detail. In the end, typical topologies of HVDC devices based on IGBT are provided, including examples of parameters and characteristics of the devices in the power system.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA052601) and State Grid Corporation of China (No. SGRI-WD-71-13-006, No. SGRI-WD-71-14-005).

Key words: insulated gate bipolar transistor (IGBT); flexible HVDC; converter valves; typical topologies

(上接第 70 页 continued from page 70)

Power Supply Path Searching Algorithm for an Electricity Losing Island Based on Distance Vector

WANG Chaojie, REN Jianwen, XU Weinan, LI Yuejia

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: For the load power loss due to power grid failure or equipment maintenance, it has now become an essential function of looking for a power supply path for the power lost load in a lot of power grid analysis software. The grid can be divided into several electric islands through the topological analysis program. The traditional searching algorithm for island restoration of power supply path based on the tree search method is inadequate in path searching. Inspired by the Internet routing protocol algorithm, all kinds of electric islands are regarded as routers while a kind of search algorithm based on distance vector is put forward. Through the formation of initial routing tables and routing table update processing, the entire network routing table of each island is eventually obtained, through which all the possible power supply paths of power losing electric islands in conformity with dispatching schedules can be obtained. By using the optimal power flow of the interior point method, the feasibility of power solutions is verified as is the algorithm effectiveness on an IEEE 14-bus standard test system.

Key words: electricity losing island; distance vector; routing selection; power supply path; optimal power flow