

基于 MgB_2 高温超导材料的吉瓦级远程直流输电研究

王颖杰¹, 杨波², 左慧芳², 齐东迁³

(1. 中国矿业大学可持续能源研究院, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008;

3. 电光防爆科技股份有限公司, 浙江 温州 325600)

摘要: 本文主要探究以具有成本效益和环保特性的新型高温超导材料 (MgB_2) 作为直流输电电缆, 以液氢作为冷却剂, 实现吉瓦级远程直流输电的可能性。首先分析超导直流输电的必要性及其优势, 说明超导直流输电的基本模型, 然后介绍 MgB_2 超导电缆和液氢制冷系统, 接着阐述基于十二脉动换流器的直流输电控制策略。最后使用 PSCAD 软件完成超导直流输电系统仿真, 在相同传输条件下进行 MgB_2 高温超导电缆和传统电缆的线路功率损耗比较, 证明了超导直流输电系统具有线路损耗低, 容量不受限制的优点, 为 MgB_2 高温超导材料在超导直流输电领域的开发设计提供初步依据。

关键词: 吉瓦级远程直流输电; 超导直流输电; MgB_2 ; 十二脉动换流器

中图分类号: TM725

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0080-06

0 引言

目前我国能源需求日益增长, 导致雾霾等环境问题日益严重。同时, 大部分水力发电、太阳能发电和风能发电分布在西部地区, 而用电密集的负荷中心集中在东部地区。因此通过西电东送的方式解决我国的能源问题成为不错的选择。但传统的交流特高压电网, 由于占地面积大、投资成本高、能源损耗大及系统阻抗增大导致容量瓶颈等问题, 在应对未来更大能源传输方面显得力不从心。因此, 直流输电引起人们的关注。直流输电不仅可以根

据系统要求传输功率, 还可以利用直流的快速控制作用提高交流系统的稳定性。同时, 直流输电可以实现电力系统非同步连接, 对我国不同频率的电网互联意义深远。

根据超高压换流器的最新进展, 常规的高压直流输电系统代表高压长距离输电最有成本效益的选择。在我国, 向家坝—上海 ± 800 kV 线路已投运, 并计划在 ± 1100 kV 附近的线路进行开发。然而, 即使是这种超高压直流输电, 随着容量和距离的增加, 传输效率也迅速下降。随着高温超导的出现, 超导直流输电被视为在不增加电压等级的前提下提高传输容量的唯一方法^[1]。超导直流输电, 具有低电压、大电流的特点, 损耗低, 容量大, 绝缘要求低。在超导电缆及冷却系统成本降低的前提下,

超导直流输电将拥有很好的经济效益。

1 超导直流输电模型

由于晶闸管换流技术在大功率电能传输方面的出色表现, 选择十二脉动换流器作为超导直流输电的基本模型, 如图 1 所示。十二脉动换流器是现有高压直流输电工程最经典换流器, 由两个六脉动换流器在直流侧串联而成。换流变压器阀侧绕组一个为三角形连接, 一个为星形连接, 使直流侧得到一个周期脉动 12 次的直流电压^[2]。相比于六脉动换流器, 十二脉动换流器交流侧和直流侧谐波含量均大幅下降, 减少了系统对平波电抗器、交流滤波器及直流滤波器的需求。与传统直流输电相比, 本文将输电线路改造为 MgB_2 超导电缆, 通过配置相应的冷却系统, 降低了传输电能时的线路损耗。

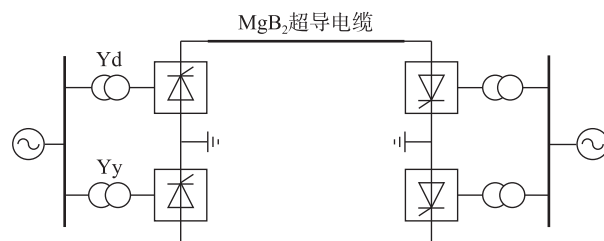


图 1 超导直流输电模型

Fig.1 Superconducting HVDC model

晶闸管结构简单, 工作可靠, 且功率水平高, 因此基于晶闸管的十二脉动换流器广泛应用于大功率高压直流输电领域。但晶闸管是半控型器件, 不具备自关断的能力, 故晶闸管换流技术存在谐波含

量高、逆变失败风险大、消耗大量无功功率等缺点。如果采用电压源换流器,超导直流输电系统的性能将得到优化。模块化多电平换流器(MMC)是一种新型电压源换流器,其拓扑结构如图2所示^[3,4]。通过MMC基本单元的串并联,可以满足超导直流输电的参数要求。MMC采用载波移相调制算法,双闭环PI控制策略,使直流输电潮流控制更快,谐波含量更低。另外,MMC还可通过合适的控制策略实现多端互联,增加电力系统的稳定性^[5]。

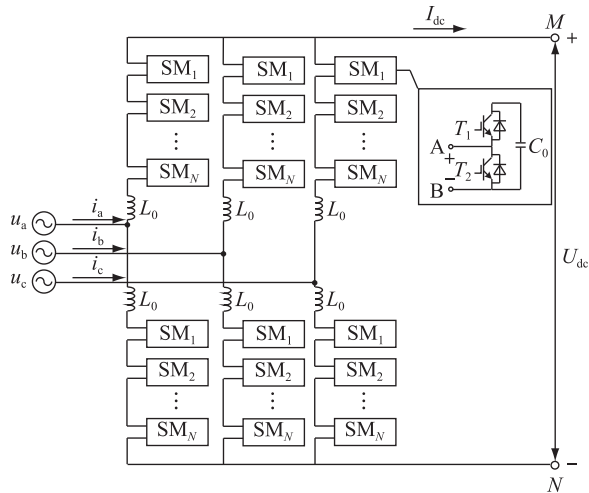


图2 模块化多电平换流器

Fig.2 Modular multilevel converter

2 MgB₂超导电缆

超导电缆,即在特定的触发条件下,呈现零电阻特性的电缆。零电阻特性是无损耗电能传输的基础。在常规导体中,电流是电子的定向移动,拥有动能的电子与晶格碰撞,动能转化为热能,产生电阻损耗。然而,超导体中,电子却能自由地穿过晶格,不产生能量损失。实验证实,即使超导体两端电压撤去,超导体中的电流仍可存在数年且无能量损失^[6]。由于这种特性仅在直流下显现,因此超导输电的方式仅定义在直流的范畴内。

超导体向超导态的转变需要一定的触发条件,除了广为人知的临界温度(T_c)外,还包括临界磁场强度(H_c)和临界电流密度(J_c)^[6]。满足式(1),超导体才会呈现超导态。任何一个参数不满足,都会破坏超导态。

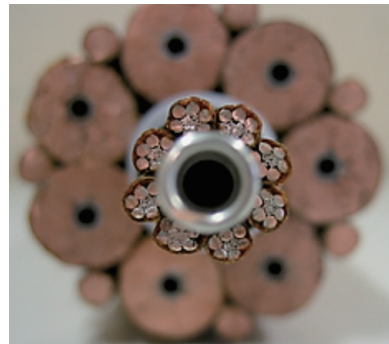
$$\begin{cases} T < T_c \\ H < H_c \\ J < J_c \end{cases} \quad (1)$$

目前,超导电缆的研究取得了许多突破性进展。汞系氧化物 Hg-Ba-Ca-Cu-O,是已知临界温度最高的超导电缆,达到 130 K 以上^[7]。但是,几乎

所有的高温超导电缆都存在成本昂贵、制造困难的缺点,很大程度上制约了超导直流输电的发展。

2001年,超导材料 MgB₂被日本青山学院秋光纯发现。其超导临界温度在 39 K,呈现超导特性的最佳工作温度在 16~20 K^[8]。2011年,Carlo Rubbia 提出开发世界上第一条承载 20 kA 电流 MgB₂超导电缆的想法,并于 2014 年在欧洲核子研究组织(CERN)测试成功^[9]。MgB₂适合作为超导直流输电电缆的原因如下:(1) MgB₂由自然界中丰富存在的镁元素和硼元素组成,价格低廉。MgB₂超导电缆成本已降低到 1 \$/m 以下^[10]。(2) MgB₂制造简单,韧性好,容易加工成线材。根据横截面积,典型 MgB₂电缆长度在 1~5 km^[11]。(3) MgB₂具有相对较高的临界电流密度和临界磁场强度,超导性能稳定。

MgB₂超导电缆中,MgB₂载流层是其核心组成。载流层通常由若干 MgB₂载流束及铜心组成,如图3所示。在 $T=20$ K,磁感应强度 $B=1$ T 前提下,MgB₂载流束的临界电流密度 J_c 可以达到 1 kA/mm²^[12]。

图3 MgB₂载流层实物Fig.3 Practical picture of MgB₂ current-carrying layer

另外,实验室研究成果表明,通过“掺杂”的方法,可以在 MgB₂的基础上提高其临界温度^[6]。根据 BCS 理论估算,MgB₂临界温度可达 70 K^[13]。如果能将临界温度提高到 70 K,MgB₂的实用价值将进一步提高。

3 液氢冷却系统

超导直流输电需要持续的低温操作来冷却超导电缆。由于 MgB₂呈现超导特性的最佳温度在 16~20 K,因此其冷却系统相对复杂。

沸点低于 MgB₂临界温度的制冷液体都可以用作冷却液。常用的制冷液体中,液氦、液氢满足该条件。但液氦的沸点在 8 K,其冷却系统复杂且昂贵,不具备实用价值。因此选择液氢作为 MgB₂超导电缆的冷却液。液氢无色,无味,沸点在 20 K,恰好

满足 MgB_2 的最佳工作温度。

基于液氢制冷系统的 MgB_2 超导电缆的结构如图 4 所示。液氢通过内管进入电缆,使中心部位的 MgB_2 载流层浸在 16 K 温度的环境中。之后,液氢通过外管返回,释放热量并实现回流。考虑绝热层的真空构造和 $T \approx 300$ K 的环境温度,液氢外管的热损失在 1 W/m 以下^[14]。另外,液氢还具有出色的绝缘特性。假定在已确保的低温下加压,液氢的最终击穿能力在 1000 kV/cm 左右。

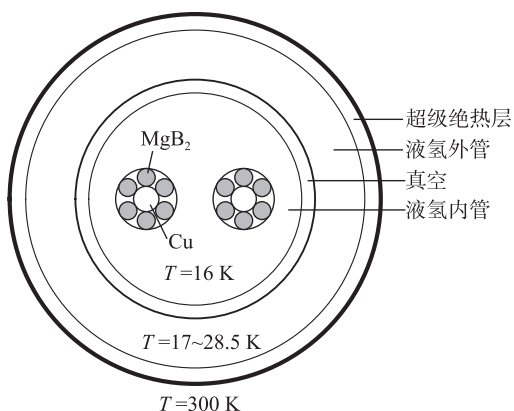


图 4 MgB_2 超导电缆结构

Fig.4 Structure of MgB_2 superconducting cable

为了通过有限长度的超导电缆实现远程电能传输,需要在 300 km 左右的间隔设置中继站^[15],以实现电缆的连接及液氢的冷却工作(如图 5 所示)。中继站包括加压器、压缩机、换热器、液氢存储器等。外管温度为 28.5 K 的液氢首先进入加压器增压,然后通过基于压缩机作用的换热器使温度降低到 15 K,最后进入液氢内管,实现液氢的循环。另外,液氢存储器中液氢可以双向流动,使液氢的循环更灵活。

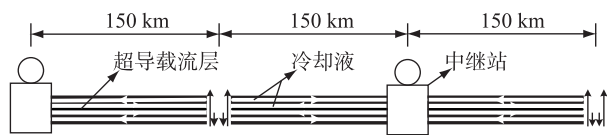


图 5 液氢冷却系统

Fig.5 Hydrogen cooling system

4 控制策略及仿真

本文选定的系统额定电流为 20 kA,额定电压为 125 kV,双极运行时输送功率达 5 GW。仿真基于十二脉动换流器模型。为简化模型,采取单极大地回线的运行方式,数学模型如图 6 所示^[16]。

根据数学模型,整流侧直流电压 U_{der} 为:

$$U_{\text{der}} = 2.7E_r \cos \alpha - 2d_r I_{\text{dc}} \quad (2)$$

逆变侧直流电压 U_{dci} 为:

$$U_{\text{dci}} = 2.7E_i \cos \beta + 2d_i I_{\text{dc}} = 2.7E_i \cos \gamma - 2d_i I_{\text{dc}} \quad (3)$$

直流侧电流 I_{dc} 为:

$$I_{\text{dc}} = \frac{2.7(E_r \cos \alpha - E_i \cos \beta)}{R_d + 2d_r + 2d_i} \quad (4)$$

送端功率 P_r 为:

$$P_r = U_{\text{der}} I_{\text{dc}} \quad (5)$$

受端功率 P_i 为:

$$P_i = U_{\text{dci}} I_{\text{dc}} \quad (6)$$

式中: E_r 为送端电网交流线电压有效值; E_i 为受端电网交流线电压有效值; d_r, d_i 为等值换相电阻; α 为触发角; β 为超前触发角; γ 为熄弧角。

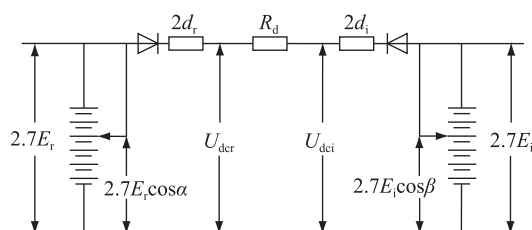


图 6 超导直流输电数学模型

Fig.6 Mathematical model of superconducting DC transmission

仿真模型主要包括电网电源、换流变压器、十二脉动换流器、交流滤波器、平波电抗器及直流线路电阻 R_d 。由于 MgB_2 电缆的超导特性, $R_d \approx 0$, 这里用 0.01Ω 等效。在单极大地回线方式下,额定电压为 125 kV,额定功率为 2.5 GW。直流输电控制中,最重要的就是对换流器的控制,通过改变换流器触发角 α 完成对功率的控制。

整流侧采用定电流和最小触发角控制。定电流控制是直流输电最基本的控制方式。首先设置电流给定值,与实时直流电流比较,得到电流偏差值。之后经 PI 调节器得超前触发角 β ,由 $\alpha = \pi - \beta$,得到触发角的控制信号。在 $U_d - I_d$ 控制特性曲线中,定电流控制为一条竖直直线,如图 7 BF 段。其次,整流侧采用最小触发角控制。若触发角 α 过小,会导致晶闸管两端电压过低,使其同时性变差。为避免这种现象发生,需对 PI 调节器限幅。最小触发角的常用取值为 5° 。由式(2)可得 $\alpha = 5^\circ$ 的特性曲线,如图 7 AB 段。

逆变侧采用定熄弧角和定电流控制。采用定熄弧角控制是为了防止换相失败。逆变器在运行时,从阀电流变为零算起,到该阀两侧电压重新变为正的电角度,称为熄弧角 γ 。若 γ 太小,晶闸管在这段时间没有恢复阻断能力,就会出现晶闸管重新导通的现象。这时,逆变器和电网间会出现很大的

换流,损坏开关器件。因此,需通过 Minimum Gamma 元件,获得逆变器一个周期中最小的 γ 角,之后与整定值及电流偏差引起的 $\Delta\gamma$ 作比较^[17]。一般当 γ 小于 10° 时,就认为发生了逆变失败。为留有一定裕度,整定值设为 15° 。由式(3)可得 $\gamma = 15^\circ$ 的特性曲线,如图 7 CD 段。另外,由于逆变侧定 γ 特性曲线 CD 段不会和降压运行的整流侧特性线 A'B'F 段相交,当系统需要降压运行时,可能导致系统停运^[18]。因此需在逆变侧加定电流控制防止这种现象发生。电流裕度取 0.1 p.u.^[19] 时,逆变侧的定电流特性曲线相对于整流侧向左平移了 0.1 p.u.。

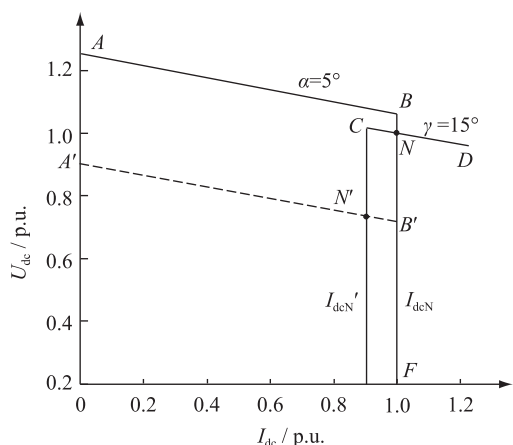


图 7 高压直流输电控制特性曲线

Fig.7 Control characteristic curve of HVDC

对于超导直流输电系统,稳态工作点是整流侧和逆变侧特性曲线的交点。正常运行时,交点为额定工作点 N 点。此时,整流侧控制电流,逆变侧控制电压。降压运行时,交点为 N' 点。此时,整流侧控制电压,逆变侧控制电流。

根据设计的控制系统进行仿真,结果如图 8—10 所示。超导输电系统仿真显示,当 $R_d = 0.01 \Omega$ 时, $U_{\text{der}} = 125.2 \text{ kV}$, $U_{\text{dei}} = 125 \text{ kV}$, $I_{\text{dc}} = 20 \text{ kA}$ 。如图 9 所示,送端功率 P_r 为 2504 MW,受端功率 P_i 为 2500 MW,线路损耗在 4 MW。系统运行在设计额定工作点,即图 7 中的 N 点。

将 MgB₂ 超导电缆改为常规电缆,当 $R_d = 2 \Omega$ 时, $U_{\text{der}} = 138.3 \text{ kV}$, $U_{\text{dei}} = 102.3 \text{ kV}$, $I_{\text{dc}} = 18 \text{ kA}$ 。如图 10 所示,送端功率 P_r 为 2489 MW,受端功率 P_i 为 1841 MW,线路损耗在 648 MW。由于系统设计的额定电流很大,线路压降达到 36 kV,因此稳态工作点一分为二,整流侧为最小触发角控制,工作点是图 7 中 AB 与 I'_{dcN} 的交点;逆变侧为定电流控制,工作点相比整流侧下移 0.288 p.u.。

可见,基于 MgB₂ 高温超导材料的直流输电系统具有线路损耗低、容量不受限制的优点。

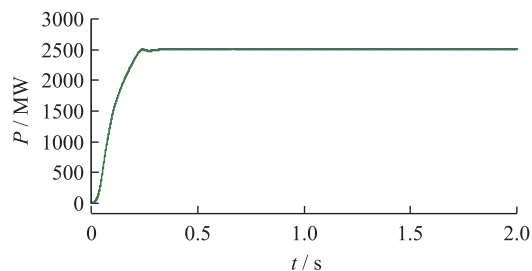


图 8 功率波形 (MgB₂ 超导输电线路 $R_d = 0.01 \Omega$)

Fig.8 Power waveform (equivalent resistance of MgB₂ superconducting transmission line; $R_d = 0.01 \Omega$)

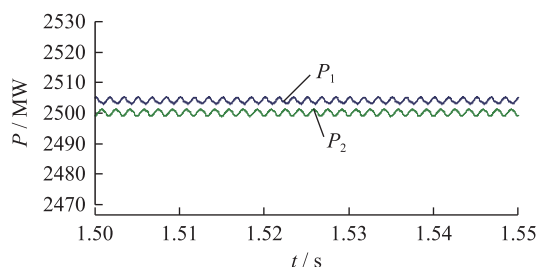


图 9 功率波形 (放大) (MgB₂ 超导输电线路 $R_d = 0.01 \Omega$)

Fig.9 Power waveform (enlarged) (equivalent resistance of MgB₂ superconducting transmission line; $R_d = 0.01 \Omega$)

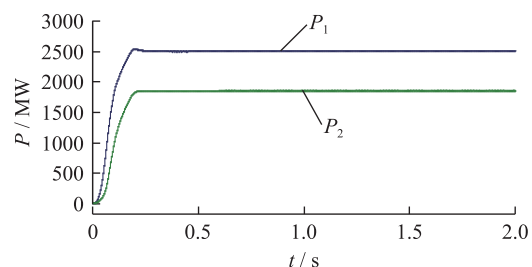


图 10 功率波形 (常规输电线路 $R_d = 2 \Omega$)

Fig.10 Power waveform (equivalent resistance of conventional transmission line; $R_d = 2 \Omega$)

5 结语

本文介绍了基于 MgB₂ 高温超导材料的直流输电系统。MgB₂ 高温超导电缆,配合液氢冷却系统,设计相对合理。但是, MgB₂ 超导电缆的变性及液氢潜在的燃爆问题应引起关注。拟应用于超导直流输电的换流器包括十二脉动换流器和 MMC。本文通过十二脉动换流器进行仿真,一定程度证明了超导直流输电的优越性。鉴于超导电缆可承受很大的电流,直流母线电压不用设置太高,今后的研究中需进一步权衡以确定更合适的换流器类型。

参考文献:

- [1] 黄琦, 金建勋, 张晋宾. 基于高温超导的远距离直流输电及其性能仿真研究[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 45-49.

- HUANG Qi, JIN Jianxun, ZHANG Jinbin. Simulation study on performance of long-distance superconducting DC power transmission system[J]. Electric Power, 2006, 39(3):45-49.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:77-82.
- HAN Minxiao, WEN Jun, XU Yonghai. Principle and operation of HVDC[M]. Beijing: China Machine Press, 2008:77-82.
- [3] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multi-level converter topology suitable for a wide power range[C]// Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy, 2003.
- [4] 季振东, 赵剑锋. 模块化多电平技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6):41-45.
- JI Zhendong, ZHAO Jianfeng. Prospect analysis of modular multilevel technology in power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):41-45.
- [5] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电网的电压控制措施研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):54-58.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):54-58.
- [6] 李文献. 二硼化镁(MgB₂)的超导机理和性能研究[D]. 上海:上海大学, 2011, 2-31.
- LI Wenxian. A study on superconductivity mechanism of MgB₂ and its superconducting properties[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011, 2-31.
- [7] SCHILLING A, CANTONI M, GUO J D, et al. Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system[J]. Nature, 1993, 363(6424):56-58.
- [8] GLOWACKI B A, MAJOROS M, VICKERS M, et al. Superconductivity of powder-in-tube MgB₂ wires[J]. Superconductor Science & Technology, 2001, 14(14):193.
- [9] ANTONELLA D R. World-record current in a superconductor[OL]. <http://home.cern/about/updates/2014/04/world-record-current-superconductor>.
- [10] PENCO R, GRASSO G. Recent development of MgB₂-based large scale applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2):2291-2294.
- [11] Products[OL]. <http://www.columbussuperconductors.com/products.asp>.
- [12] GRASSO G. Private communication[OL]. http://www.iass-potsdam.de/fileadmin/user_upload/Grasso_presentation.pdf.
- [13] 唐丹. 适用于超导态的一般固体导电理论及超导临界温度 T 的计算方法[D]. 沈阳:东北大学, 2005.
- TANG Dan. A common solid conduction theory applies to superconductive state and a method to calculating T_c[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [14] BALLARINO A, BRUZEK C E, DITTMAR N, et al. The best paths project on MgB₂, superconducting cables for very high power transmission[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3):1-1.
- [15] HEIKO T, ADELA M, ALEXANDER C, et al. Superconducting transmission lines-Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55:59-72.
- [16] 惠慧. 高压直流输电系统的仿真建模[D]. 北京:华北电力大学, 2010.
- HUI Hui. Simulation and modeling of HVDC transmission system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [17] 罗隆福, 雷园园, 李勇, 等. 定熄弧角控制器对直流输电系统的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5):97-103.
- LUO Longfu, LEI Yuanyuan, LI Yong, et al. Effects of constant arc extinguishing angle controller on HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2009, 21(5):97-103.
- [18] JIANG X, GOLE A M. An energy recovery filter for HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1):119-127.
- [19] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:97-100.
- ZHAO Wanjun. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010:97-100.

作者简介:



王颖杰

王颖杰(1979—),男,浙江金华人,讲师,主要研究方向为电力传动、柔性直流输电及新能源并网技术;

杨波(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为直流输电(E-mail: 1095832613@qq.com);

左惠芳(1991—),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电;

齐东迁(1976—),男,浙江金华人,工程师,从事防爆电气技术工作。

Research on GW Level Remote HVDC Based on MgB₂ HTS Superconductor

WANG Yingjie¹, YANG Bo², ZUO Huifang², QI Dongqian³

(1. Sustainable Energy Research Institute of CUMT, Xuzhou 221008, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China;

3. Dianguang Explosion Technology Company, Wenzhou 325600, China)

Abstract: The research aims at exploring the possibility of GW level remote HVDC through a new type of superconducting material (MgB₂) as a cost-effective and environmental-friendly DC line and liquid hydrogen as coolant. The necessity and advantages of superconducting DC transmission are analyzed firstly. Then basic method of HVDC converter is explained. The MgB₂ superconducting cables and liquid hydrogen refrigeration system are introduced and the DC transmission control strategy based on twelve pulse converter is illustrated. Through the Pscad software, the simulation of superconducting DC transmission is completed and the line power losses between the MgB₂ HTS superconducting cable and traditional cable under the same condition are compared, which proves the advantages of low loss and unlimited capacity and provides the preliminary basis for the development of MgB₂ HTS superconductor in the field of superconducting DC transmission.

Key words: GW level remote HVDC; superconducting DC transmission; MgB₂; twelve pulse converter.

(编辑 徐林菊)

(上接第74页)

[15] 吴晓东,魏泽民. 影响变压器频率响应测试结果的因素分析[J]. 电力设备,2004,5(10):60-63.

WU Xiaodong, WEI Zemin. The influencing factors of transformer frequency response test results analysis [J]. Electric Power Equipment, 2004, 5 (10): 60-63.

[16] 朱明林,金之俭,朱子述. 变压器绕组变形诊断中的等效模型参数辨识[J]. 电力系统自动化,2001,25(8):38-41.

ZHU Minglin, JIN Zhijian, ZHU Zishu. The diagnosis of transformer winding deformation parameter identification of equivalent model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (8): 38-41.

[17] 包玉树. 变压器绕组变形检测技术在江苏电网的应用[J]. 江苏电机工程,2005,24(4):49-51.

BAO Yushu. The application of transformer winding deformation detection technology in jiangsu power grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24 (4): 49-51.

作者简介:



陈旭

陈旭(1990—),男,河南舞钢人,工程师,从事电气试验工作(E-mail: 469367601@qq.com);

王淮南(1976—),男,江苏南京人,技师,从事电气试验工作;

孙立群(1968—),男,江苏南京人,高级技师,从事电气试验工作;

张灿(1989—),男,江苏沛县人,助理工

程师,从事电气试验工作。

Difference Analysis of Oil-gas Bushing-connected Transformer Winding Deformation Test

CHEN Xu, WANG Huaining, SUN Liqun, ZHANG Can

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 210000, China)

Abstract: The field winding deformation test of the transformer with oil and gas bushing connected can be processed only by acquiring signals at the bushing tap. The influence of the bushing tap and the gas insulated line section makes the amplitude-frequency response curves different from the factory test and commissioning test. The method of constructing equivalent model of transformer is adopted, and the amplitude-frequency response curves of the field test at the bushing tap signal and the commissioning test at the winding end signal are compared. Differences and production principles are analyzed from the curve variation and amplitude variation of low frequency segments, medium frequency segments and high frequency segments. It's concluded that the curves should not be contrasted vertically, and suggestions for on-site tests are given.

Key words: oil-gas bushing connection; transformer; winding deformation test; amplitude-frequency response

(编辑 刘晓燕)