

考虑直流电压无差调节的 MMC-MTDC 协调下垂控制策略

朱弘祺, 李勇, 王姿雅, 李畅, 曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 直流电压稳定对多端直流输电(MTDC)系统的安全可靠稳定运行至关重要, 对此提出一种新型协调下垂控制策略。通过建立 MTDC 系统的等效网络模型, 推导小信号解析式, 然后将小信号补偿量注入传统下垂控制中, 实现 MTDC 系统在不同工况下直流电压的无差调节。采用 PSCAD/EMTDC 建立了基于模块化多电平换流器的四端直流输电系统的仿真模型, 仿真结果验证了所提控制方法的有效性。在所提控制方法作用下, 直流电压在扰动下会恢复到原来的稳态运行状态, 避免了传统下垂控制产生的直流电压偏差, 实现了直流电压的额定值运行。

关键词: 多端直流输电系统; 下垂控制; 小信号; 无差调节

中图分类号: TM 721.1; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.027

0 引言

与两端直流输电系统相比, 多端直流输电 MTDC(Multi-Terminal Direct Current) 系统能够实现多电源供电和多落点受电, 具有传输损耗低、潮流控制灵活、能够连接异步电网且易于扩展等优点^[1-2], 是大规模新能源接入交流电网的关键技术之一。基于模块化多电平变换器 MMC(Modular Multilevel Converter) 的 MTDC 系统既能够充分发挥 MMC 技术的优势, 又兼顾了 MTDC 系统的经济性、灵活性和可靠性等特点^[3], 成为直流输电技术的研究热点。

MTDC 系统的协调控制方法主要有主从控制、直流电压偏差控制和下垂控制^[4]。文献[3]提出了一种改进直流电压下垂控制策略, 同时引入一个公共直流参考电压, 实现多点直流电压控制和站间功率协调控制。文献[5]指出了直流线路电压降落对功率分配的影响, 但并未提出解决方法。文献[6]提出一种分段系数的电压斜率协同控制策略, 然而该控制策略只能减小而不能完全消除直流电压和有功功率静态偏差。在 MTDC 系统中, 直流电压的稳定代表着功率的平衡^[7-8], 直流电压波动会导致 MMC 过调制, 进而导致变换器输出电压失真、谐波畸变率增大、电能质量恶化; 直流电压过低会导致换流站和直流电缆损耗增大。因此, 为实现 MTDC 系统的稳定高效运行, 进行直流电压的无差调整是必要的。

本文基于 MMC-MTDC 系统提出一种将直流电缆电压降落考虑在内的新型协调下垂控制策略。首

先对 MTDC 系统直流电缆进行等值电路建模, 通过考虑直流电缆上的压降对下垂控制进行数学约束, 在此基础上建立了小信号模型的解析式, 然后将小信号补偿量注入下垂控制中, 实现 MTDC 系统在不同工况下的直流电压无差调节。采用 PSCAD/EMTDC 建立了基于 MMC 的四端直流输电系统仿真模型, 在暂态稳态运行工况下对所提策略进行了仿真分析, 结果验证了所提控制方法的有效性。

1 MTDC 系统建模与分析

1.1 MTDC 系统拓扑

MTDC 系统存在多种拓扑形式, 常用的有辐射形网络和环网^[9]。本文采用一种典型的连接海上风电场的 MTDC 系统拓扑结构。如图 1 所示, MTDC 系统直流网络送端风电场侧换流站 WFC(Wind-Farm Converter) 数目为 m , 受端电网侧换流站 GSC(Grid-Side Converter) 数量为 n 。WFC 将海上风能汇集, 通过海底直流电缆将电能传输至受端各陆地电网, 功率按照协调控制方式合理分配至各陆地电网。

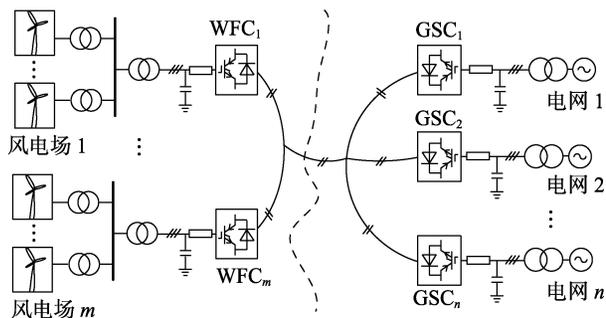


图1 MTDC系统拓扑

Fig.1 Topology of MTDC system

由于风能具有随机性, 可将风电场等效为一个变化的孤立电源, WFC 需将风能实时输入电网, 控制灵活性较低, 不适合参与系统协调控制^[10], 故

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51520105011); 湖南青年英才项目(2015RS4022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51520105011) and the Huxiang Youth Talent Program of Hunan Province(2015RS4022)

WFC 采用定交流电压控制来吸收波动的风功率^[11-12]。直流电压控制和功率分配的职能主要由 GSC 承担。

1.2 直流网络模型

图 2 为 MTDC 系统的等效电路图。图中, V_{wf1} — V_{wfm} 和 V_{gs1} — V_{gsn} 分别为各 WFC 和 GSC 的直流电压; I_{wf1} — I_{wfm} 、 I_{gs1} — I_{gsn} 和 I_g 为各支路直流电流; R_{wf1} — R_{wfm} 、 R_{gs1} — R_{gsn} 和 R 为各直流输电线路的等效直流电阻; K_1 — K_n 为各 GSC 的下垂系数; V_M 和 V_N 为公共连接点的电压。由于直流电压下垂控制仅用于 GSC, 因此主要分析各 GSC 之间的电压、电流关系。由下垂控制环节可得:

$$V_{gsi} = -K_i I_{gsi} + V_{gs0} \quad K_i > 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, V_{gsi} 、 K_i 、 I_{gsi} 、 V_{gs0} 分别为 GSC_{*i*} 的直流电压、下垂系数、直流电流、空载时的直流电压值。

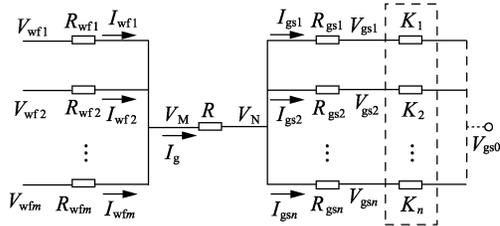


图 2 MTDC 系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of MTDC system

本文以图 1 中 $m=n=2$ 的四端直流输电系统为例。参考图 2, 考虑直流电缆压降由基尔霍夫电压定律可得:

$$V = RI \quad (2)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{gs0} - V_{wf1} \\ V_{gs0} - V_{wf1} \\ V_{wf2} - V_{wf1} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_{gs1} \\ I_{wf2} \\ I_{gs2} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} -(R_{wf1} + R_{gs1} + R + K_1) & R_{wf1} & -(R_{wf1} + R) \\ -(R_{wf1} + R) & R_{wf1} & -(R_{wf1} + R_{gs2} + R + K_2) \\ -R_{wf1} & R_{wf1} + R_{wf2} & -R_{wf1} \end{bmatrix}$$

由式(2)得:

$$I = R^{-1} V \quad (3)$$

基于图 2, 由基尔霍夫电压定律和下垂控制环节方程可得:

$$V' = TI \quad (4)$$

$$V' = \begin{bmatrix} V_{gs1} - V_{gs0} \\ V_{gs2} - V_{gs0} \\ V_{wf2} - V_{wf1} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_2 \\ -R_{wf1} & R_{wf1} + R_{wf2} & -R_{wf1} \end{bmatrix}$$

联立式(3)和(4), 在运行点附近线性化可得小信号模型:

$$\Delta V' = TR^{-1} \Delta V \quad (5)$$

本文取 GSC₁ 和 GSC₂ 的下垂系数均为 1.7, 所有输电线路电阻均为 8.3 Ω, 将其代入式(5)化简可得小信号补偿量:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{gs0}^1 \\ \Delta V_{gs0}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.257 & -0.257 \\ -0.257 & -0.257 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{wf1} \\ \Delta V_{wf2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于本文电缆长度(即阻值)和下垂系数取值一样, 故得到 GSC₁ 与 GSC₂ 的小信号补偿量相同。工程实际中注入系数取决于实际的电缆长度和下垂系数。

2 直流电压无差调节

2.1 小信号注入下垂控制

本文 GSC 采用 MMC 拓扑, MMC 的基本工作原理与特性已经有大量研究^[1-3], 此处不再赘述。图 3 为协调下垂控制框图。图中, i_{dc} 、 v_{dc} 、 v_{dc0} 分别为直流电流、直流电压以及空载时的直流电压值; Q 、 Q^* 分别为系统无功以及无功参考值; i_d 、 i_q 及 i_d^* 、 i_q^* 分别为交流电流的 d 、 q 轴分量及其参考值; v_{dg} 、 v_{qg} 分别为交流电压的 d 、 q 轴分量; v_d 、 v_q 为 MMC 内电势的参考指令值; θ 为锁相环输出相角。本文 MMC 换流站底层控制采用基于阶梯波的最近电平逼近调制 NLM(Nearest Level Modulation); 采用减小开关频率的电容电压平衡控制算法以实现均压。有功通道采用基于直流电压-直流电流的改进下垂控制, 无功通道采用无功功率控制, 电流内环控制采用基于同步旋转坐标系下的 dq 解耦控制^[13]。通过将小信号补偿量 Δv_{dc0} (即对应 1.2 节理论分析中的 ΔV_{gs0}) 注入下垂控制中, 实现 MTDC 系统中下垂控制站直流电压无差调节。

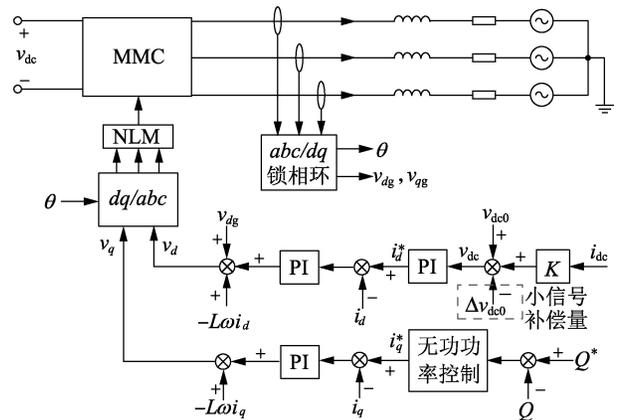


图 3 协调下垂控制框图

Fig.3 Block diagram of droop control

2.2 运行示意图

图 4 为以风电场 1 有功突增为例的直流电压调节示意图。图中, 稳态运行点 1 为初始运行点; 点 2 为传统下垂控制的稳态运行点; 点 3 为采用本文控制的稳态运行点; V_{max} 、 V_{min} 和 I_{max} 、 I_{min} 分别为直流电压和电流的上、下极限值。当风电场 1 有功出力突

增时, WFC_1 的功率控制曲线往右上方向移动。4 个换流站的运行点均沿着各自特性曲线向上移动, 有功不平衡导致直流电网功率过剩, 故各换流站的直流电压上升。此时, 无差控制开始作用, GSC_1 和 GSC_2 的下垂控制曲线在本文所提控制策略的作用下向下平移, 而基于直流电缆压降的 $V-I$ 特性曲线随之向下平移。由图 4 可见, 采用传统下垂控制受扰动后恢复的稳态运行点与初始稳态运行点的电压差相比采用本文所提协调下垂策略要大得多。由此可看出本文所提协调下垂控制策略不仅能使采用此控制策略的换流站实现直流电压的无差调节, 还能减小其他换流站由于功率不平衡导致的直流电压偏差。

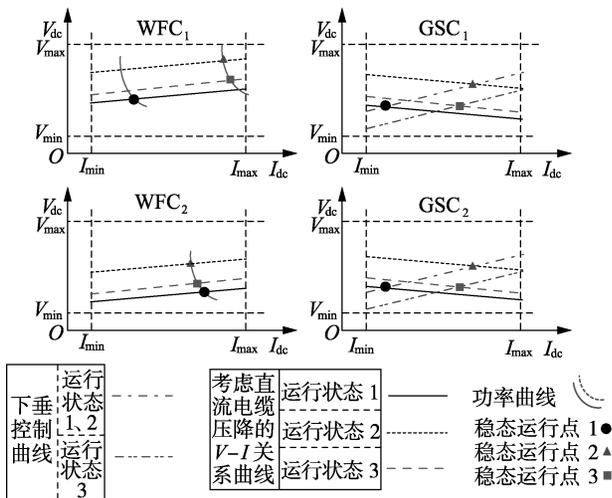


图 4 直流电压无差调节示意图

Fig.4 Schematic diagram of indifference regulation of DC voltage

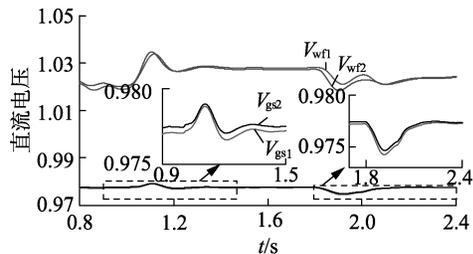
3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中建立了两输入两输出的基于 MMC 的四端直流输电系统。基本参数如下: 额定频率为 50 Hz, 直流电缆为 $5 \Omega/0.5585 \text{ H}$, 控制频率为 10 kHz, IGBT 平均开关频率为 216 Hz, 子模块电容值为 $6900 \mu\text{F}$, 单个换流站总子模块数为 128×6 , MMC 桥臂电感值为 0.04 H, MMC 桥臂等效电阻值为 0.5Ω , 换流站额定有功容量为 640 MW, 联结变压器变比为 110:168, 交流侧等效电阻、电感分别为 $0.25 \Omega, 0.02 \text{ H}$ 。4 个换流站基本参数相同, 直流电压和有功功率的基准值分别取 320 kV 和 640 MW。

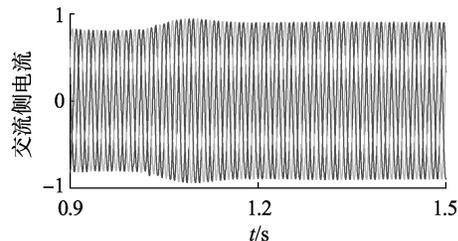
3.1 稳态仿真分析

图 5 为模拟风电场向 MTDC 系统传输功率突变的仿真结果, 图中直流电压、交流侧电流和功率均为标幺值, 后同。如图 5(c) 所示, 初始时刻, WFC_1 和 WFC_2 向 MTDC 系统输入有功功率均为 200 MW; 在 1 s 时刻, 分别增加 30 MW 和 25 MW; 在 2 s 时刻, 均减少 20 MW。图 5(b) 中电流变化不大。图 5(a) 中, 采用无差调节的受端换流站在传输功率突变时电压波动幅值在 0.003 p.u. 内, 且能消除直流电压偏

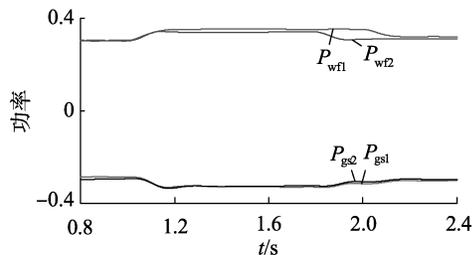
差; 而未采用无差调节的送端换流站电压偏差在 0.02 p.u. 以内。



(a) 各换流站直流电压



(b) GSC_2 交流侧电流



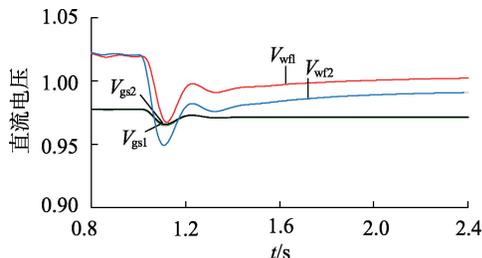
(c) 各换流站功率

图 5 传输功率突变仿真结果

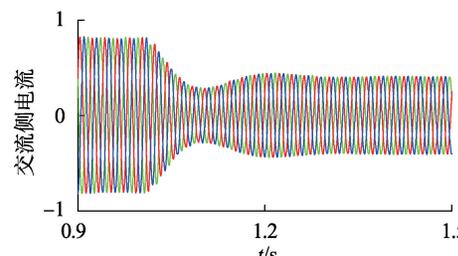
Fig.5 Simulative results of transmitted power under sudden change

3.2 暂态仿真分析

图 6 为风电场 2 换流站故障退运时的仿真结果。1 s 时连接风电场 2 的换流站突然退出运行, 如图 6(c) 所示, 其直流功率迅速下降到 0, 受端换流站功率也随之下降。如图 6(a) 所示, 采用无差调节的



(a) 各换流站直流电压



(b) GSC_2 交流侧电流

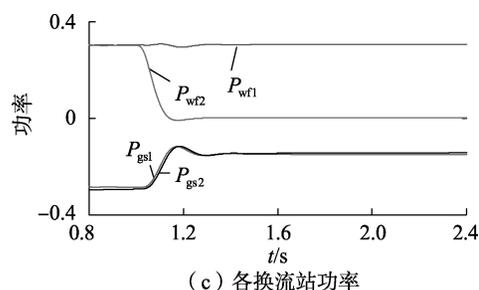


图 6 风电场 2 退出运行时仿真结果

Fig.6 Simulative results under quit running of converter in wind farm 2

受端换流站直流电压经过短时调整回初始稳态值,送端换流站 1 的电压偏差 0.02 p.u.。如图 6(b)所示,由于直流侧功率减少,直流电压维持不变,GSC₂交流侧电流减少。

4 结论

本文基于 MTDC 系统等值数学建模,阐述了直流电压无差控制的机理,提出了一种基于小信号注入的 MTDC 系统协调下垂控制策略。该控制策略可实现下垂控制换流站的无差调节,还能有效降低非下垂控制换流站的直流电压波动幅度。且所提直流电压无差控制无需改变下垂系数斜率,易于实现,适用于含更多换流器的 MTDC 系统。采用 PSCAD/EMTDC 建立了基于 MMC 的四端直流输电系统仿真模型,通过典型工况的仿真研究,验证了本文所提策略的有效性。

参考文献:

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012:128-129.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:20-21.
- [3] 阎发友,汤广福,贺之渊,等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(3):397-404.
YAN Fayou,TANG Guangfu,HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(3):397-404.
- [4] 闫文宁,李可军,王卓迪,等. 基于附加有功信号的 VSC-MTDC 系统平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):32-39.
YAN Wenning,LI Kejun,WANG Zhuodi, et al. Strategy of balanced control based on additional active power signal for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):32-39.
- [5] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(3):1441-1449.
- [6] 朱泽安,刘巍,姚晓君. 一种适用于电压源型换流器多端直流输电系统的协调控制策略[J]. 低压电器,2014(5):34-38.
ZHU Zean,LIU Wei,YAO Xiaojun. Coordinated control strategy for voltage source converter multi-terminal high voltage DC transmission system[J]. Low Voltage Apparatus,2014(5):34-38.
- [7] 彭衍建,李勇,曹一家. 基于 VSC-MTDC 的大规模海上风电并网系统协调下垂控制方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):

16-25.

- PENG Yanjian,LI Yong,CAO Yijia. Coordinated droop control for large-scale offshore wind farm grid-connected based on VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):16-25.
- [8] 付媛,王毅,张祥宇,等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):130-136.
FU Yuan,WANG Yi,ZHANG Xiangyu, et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):130-136.
- [9] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu,LUO Xiang,WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):8-17.
- [10] 罗永捷,李耀华,王平,等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 PV 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报,2014,39(增刊 1):408-415.
LUO Yongjie,LI Yaohua,WANG Ping, et al. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,39(Supplement 1):408-415.
- [11] PINTOR T,BAUER P,RODRIGUES S F, et al. A novel distributed direct voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(6):2429-2441.
- [12] 张海波,袁志昌,赵宇明,等. VSC-MTDC 系统变载距直流电压下垂控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):60-64.
ZHANG Haibo,YUAN Zhichang,ZHAO Yuming, et al. Variable intercept DC-voltage droop control for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):60-64.
- [13] 刘盼盼,荆龙,吴学智,等. 一种 MMC-MTDC 系统新型协调控制策略[J]. 电网技术,2016,40(1):64-69.
LIU Panpan,JING Long,WU Xuezhi, et al. A new coordinated control strategy for MMC-MTDC system and stability analysis[J]. Power System Technology,2016,40(1):64-69.

作者简介:



朱弘祺

朱弘祺(1993—),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要研究方向为模块化多电平换流器和多端柔性直流输电(**E-mail**: zhuhongqi1993@163.com);

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制、电力系统运行与控制(**E-mail**: yongli@hnu.edu.cn);

王姿雅(1976—),女,湖南长沙人,博士,主要研究方向为电力电子系统与控制(**E-mail**: wangziya@126.com);

李畅(1992—),男,湖南衡阳人,博士研究生,研究方向为电能质量控制、柔性直流输电(**E-mail**: lichanglunwen@163.com);

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能电网技术等(**E-mail**: yjcao@hnu.edu.cn)。

(下转第 213 页 continued on page 213)

- transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1977, 96(6):1809-1814.
- [20] 电力行业电力规划设计标准化技术委员. 电流互感器和电压互感器选择及计算导则:DL/T 866—2004[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [21] 沈阳变压器研究所. 保护用电流互感器暂态特性技术要求:GB 16847—1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [22] 全国电磁计量技术委员会. 电力互感器:JJG 1021—2007[S]. 北京:中国计量出版社,2007.
- [23] 苏毅,屠黎明,盛和乐,等. 电力互感器深度饱和时保护性能研究和参数选择[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):100-104. SU Yi, TU Liming, SHENG Heyue, et al. Protection performance study and parameter selection when current transformer deeply saturated[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19):100-104.
- [24] 崔迎宾,谭振宇,李庆民,等. 电流互感器剩磁影响因素和发生规律的仿真分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):87-91. CUI Yingbing, TAN Zhenyu, LI Qingmin, et al. Current transformer remanence influencing factors and occurrence regularity of simulation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23):87-91.
- [25] 李长云,李庆民,李贞,等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):127-132. LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19):127-132.

作者简介:



段建东

段建东(1973—),男,湖南武冈人,教授,博士,研究方向为电力系统分析、继电保护、新能源接入技术等(**E-mail**:duanjd@xaut.edu.cn);

雷 阳(1993—),男,陕西旬阳人,硕士,主要从事变压器互感器的建模、电力系统继电保护方面的研究工作(**E-mail**:lei_yang_ly@163.com)。

Empirical analysis on transient saturation characteristic of current transformer

DUAN Jiandong¹, LEI Yang^{1,2}, JIN Zhuanting¹, ZHANG Xiaoqing³, ZHANG Yiyang³, LI Yunge³

(1. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the transient saturation problem of P-level CT (Current Transformer) in power system, the operation of CT in 330 kV /110 kV short circuit system is simulated. Under the transient flow up to 48 kA, the transient saturation characteristics of CT are discussed and empirically tested by exploratory tests. For the application of transient saturation characteristics, the differential relays are also considered in the experiment for the misoperation analysis of relay protection. According to the transient coefficient, the judgment basis for the selection of P-level CT for protection is given. Under the actual empirical analysis of the CT transient characteristics, the obtained conclusions give a reference basis for the safety and stability of the P-level CT in the system operation.

Key words: P-level current transformer; transient saturation; high-current test; saturation characteristics application

(上接第 199 页 continued from page 199)

Coordinated droop control strategy considering indifference regulation of DC voltage for MMC-MTDC system

ZHU Hongqi, LI Yong, WANG Ziya, LI Chang, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The stable DC voltage is crucial for the safe and reliable operation of MTDC (Multi-Terminal Direct Current) transmission system. A novel coordinated droop control strategy is proposed. The equivalent network model of MTDC system is built, and a small-signal based analytical expression is derived. The small-signal compensation term is injected into the conventional droop control to realize the indifference regulation of DC voltage in various operation conditions. The simulation model of four-terminal DC system based on modular multilevel converter is established by PSCAD/EMTDC. The simulative results validate the effectiveness of the proposed method. DC voltage will return back to the initial steady operation point under the disturbance with the proposed control method, which avoids the static error of DC voltage caused by the conventional droop control method, and implements the DC voltage operation under the rated value.

Key words: MTDC system; droop control; small signal; indifference regulation