

DOI: 10.7652/xjtuxb201308019

识别模型参数的电压源换流器型直流输电线路纵联保护

宋国兵¹, 靳幸福¹, 李德坤^{1,2}, 靳东晖¹, 马志宾¹, 索南加乐¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 山东电力集团公司济南供电公司, 250012, 济南)

摘要: 针对电压源换流器型直流(VSC-HVDC)输电线路主保护耐过渡电阻能力差、后备保护动作速度慢的问题,提出了一种识别模型参数的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护新原理。该原理将区外故障等效为正的电容模型,区内故障等效为负的电容模型。对于电压等级为 ± 60 kV、电缆线路长为 300 km 的 VSC-HVDC 仿真模型,发生区外故障时,识别出的线路对地电容约为 $80 \mu\text{F}$;发生区内故障时,识别出的并联电容负值约为 $-1\ 000 \mu\text{F}$ 。通过判别识别出的电容值的正负,即可区分区内和区外故障。结果表明,该原理不受过渡电阻、线路分布电容和控制方式的影响,灵敏度较高,在各种工况下均能在发生故障后 10 ms 内准确区分区内和区外故障,具有一定的实用价值。

关键词: 电压源换流器直流输电;模型识别;纵联保护;故障分量

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0110-05

Novel Pilot Protection for Voltage Source Converter High Voltage Direct Current Transmission Lines by Identifying Model Parameters

SONG Guobing¹, JIN Xingfu¹, LI Dekun^{1,2}, JIN Donghui¹, MA Zhibin¹, SUONAN Jiale¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Ji'nan Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Ji'nan 250012, China)

Abstract: To solve the problems in the existing protection for high voltage source converter high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission lines, such as insufficient sensitivity for main protection and slow operation for backup protection, a novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines by identifying model parameters is proposed. In the principle, the external fault is equivalent to a positive capacitance model, while the internal fault is equivalent to a negative capacitance model. For a ± 60 kV VSC-HVDC simulation model of 300 km cable lines, the identified capacitance is positive line-to-ground one, about $80 \mu\text{F}$, when an internal fault occurs; the identified capacitance is negative shunt one, about $-1\ 000 \mu\text{F}$, when an external fault occurs. Internal faults and external faults can be distinguished by judging whether the identified capacitor is positive or negative. The results show that this principle, unaffected by transition resistance, line distributed capacitance and control type, can identify internal faults and external faults reliably within 10 ms under various operating conditions with sufficient sensitivity.

Keywords: voltage source converter high voltage direct current transmission; model identification; pilot protection; fault component

电压源换流器型直流(VSC-HVDC)输电系统采用的全控型开关器件和高频 PWM 调制技术,是一种灵活、高效的直流输配电技术,在可再生能源发电并网、孤岛供电、城市供电、异步电网互联、多端直流输电等领域具有广阔的应用前景^[1-5]。目前,我国广东汕头的四端、浙江舟山的五端 VSC-HVDC 直流输电工程已经准备开始建设^[6]。

与其他元件相比,直流线路跨度大,所处环境恶劣,故障率高,需要一套健全可靠的继电保护来保证整个系统的安全运行。然而,VSC-HVDC 直流输电线路继电保护仅简单地借用 CSC-HVDC 线路保护原理,即以行波保护作为主保护,电流差动保护作为后备保护,而未考虑到 VSC-HVDC 自身的特点^[7]。因此,根据 VSC-HVDC 系统自身的特点,研究新型的直流输电线路继电保护原理,对保证直流输电线路的安全可靠运行意义重大。

行波保护具有动作速度快,不受 CT 饱和及长线路分布电容等因素的影响,但是对设备采样率要求高,易受噪声干扰,对高阻接地不灵敏,可靠性差^[8]。电流差动保护对高阻接地有效,但易受分布电容的影响,只能通过长延时来躲过,不适应直流输电快速控制的特点^[8]。文献[9]提出了一种基于频变参数模型的 VSC-HVDC 直流电缆线路差动保护原理,补偿了分布电容的影响,但为了保证健全极不误动,采用长延时的低定值躲过暂态过程,降低了快速性,且计算量大。文献[10]提出了一种 VSC-HVDC 直流电缆线路纵联方向保护原理,但原理中线路采用 RL 模型,存在原理误差,模型误差函数里的 RLC 需要解微分方程组得到,计算量大。文献[11]提出了一种 VSC-HVDC 直流输电线路利用电流固有频率的纵联保护原理,但计算量大,可靠性依赖固有频率的准确提取,两端和中点存在死区,需要增加辅助判据,整定复杂。

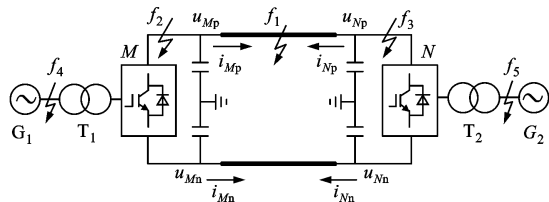
近年来,基于模型识别的保护原理得到了重视和发展^[12-15]。模型识别保护通过分析被保护元件区内、区外故障特征,分别建立合理简化的区内故障模型和区外故障模型,无需求解具体的元件参数,只计算比较模型的误差,确认与实测故障信号相匹配的故障模型,从而实现故障判别^[12]。文献[13]提出了一种基于模型识别的输电线路纵联保护方法,把区内故障等效为电感模型,区外故障等效为电容模型,通过计算模型误差来区分区内外故障。

本文在模型识别思想的基础上,结合 VSC-HVDC 两端并联大电容的特点,提出了一种识别模

型参数的直流输电线路纵联保护新原理。该原理通过比较识别出的电容值正负,可以有效地区分区内、区外故障,具有以下特点:①在时域中进行,所需数据窗短,动作速度快;②原理简单、易于整定,不受分布电容的影响;③耐过渡电阻能力强,具有绝对的选择性和分极动作能力。

1 VSC-HVDC 系统结构

图 1 为双极 VSC-HVDC 系统结构简图。VSC-HVDC 系统两端并联了大电容,主要作用是为换流器提供直流电压,同时可以缓冲系统故障时引起的直流侧电压波动,减少直流侧电压纹波,并为接受端提供直流电压支撑^[2]。



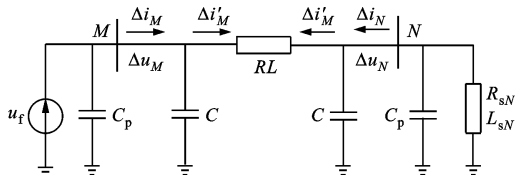
u_{Mp} 、 u_{Mn} 分别为 M 端所测的正、负极电压; i_{Mp} 、 i_{Mn} 分别为 M 端所测的正、负极电流; u_{Np} 、 u_{Nn} 分别为 N 端所测的正、负极电压; i_{Np} 、 i_{Nn} 分别为 N 端所测的正、负极电流; $f_1 \sim f_5$ 为故障发生的位置,其中 f_1 位于直流输电线路内部, f_2 位于 M 端电容器外侧, f_3 位于 N 端电容器外侧, f_4 、 f_5 分别位于 M 端和 N 端换流变压器一次侧交流线路

图 1 双极 VSC-HVDC 输电系统示意图

2 VSC-HVDC 输电线路故障特征分析

2.1 区外故障模型

根据叠加原理,当图 1 中直流线路区外发生故障时,可以等效为正常运行的电路网络和故障网络的叠加^[16],由于电压下降,相当于在正常运行的网络上叠加了一个负直流电压源^[17]。以 M 端外部故障为例,其故障分量网络如图 2 所示。



u_f 为等效故障分量电压源; C_p 为线路两端的并联大电容;线路采用 π 模型等值电路; L 、 R 、 C 为其等值电感、电阻和电容集中参数;换流器表现为感性^[2],可等效为电阻和电感, R_{sN} 、 L_{sN} 为其等效电阻和电感

图 2 线路外部故障附加状态网络

本文设电流正方向为从换流器流向线路,由基本的电路原理可知

$$\left. \begin{aligned} \Delta i'_M &= \Delta i_M - C d\Delta u_M/dt \\ \Delta i'_N &= \Delta i_N - C d\Delta u_N/dt \\ \Delta i'_M + \Delta i'_N &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

定义故障分量差动电流、差动电压如下

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{cd} &= \Delta i_M + \Delta i_N \\ \Delta u_{cd} &= \Delta u_M + \Delta u_N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则直流输电线路区外发生故障时,故障分量电流差动方程为

$$\Delta i_{cd} = C d\Delta u_{cd}/dt \quad (3)$$

分析式(3),用差动电流和差动电压识别出来的线路对地电容为正,可将直流线路外部故障状态等效为正电容电路模型,如图3所示。

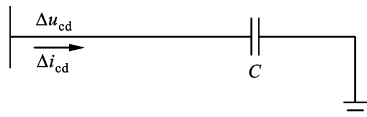


图3 线路外部故障的正电容电路模型

2.2 区内故障模型

当直流输电线路内部发生故障时,故障附加状态网络如图4所示,其中 R_{sM} 、 L_{sM} 、 R_{sN} 、 L_{sN} 分别为M端和N端换流器等效电阻和电感。

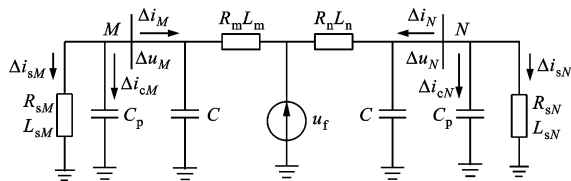


图4 线路内部故障的附加状态网络

系统发生故障瞬间,并联的大电容会向故障点放电,产生很大的冲击电流,在故障分量附加网络中表现为 Δi_{cM} 、 Δi_{cN} 分别远大于 Δi_{sM} 、 Δi_{sN} ,故系统侧可等效为并联大电容^[9-11]。对于图4,忽略换流器分流 Δi_{sM} 、 Δi_{sN} ,由基本的电路原理可得

$$\left. \begin{aligned} -\Delta i_M &= \Delta i_{cM} = C_p d\Delta u_M/dt \\ -\Delta i_N &= \Delta i_{cN} = C_p d\Delta u_N/dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据差动电流和差动电压的定义,可得

$$-\Delta i_{cd} = C_p d\Delta u_{cd}/dt \quad (5)$$

分析式(5),用差动电流和差动电压识别出的电容为线路两端并联大电容的负值,可将线路内部故障状态等效为负电容电路模型,如图5所示。



图5 线路内部故障的负电容电路模型

3 纵联保护原理与判据

由第2节分析可知,发生区外故障时用差动电流和差动电压识别出为正的线路对地电容;发生区内故障时,用差动电流和差动电压识别出的电容为线路两端并联大电容的负值。根据此特征,可构造纵联保护判据。

本判据利用识别出电容的正负来判别故障,令

$$\frac{\Delta i_{cd}}{d\Delta u_{cd}/dt} = C_j \quad (6)$$

式中: C_j 为用差动电流和差动电压识别计算出来的电容。考虑到采样时的不确定性可能造成的数据坏点和数值微分带来的误差,判据采用最小二乘法对电容进行识别计算。为了保证保护动作的快速性,又能躲过雷击干扰,最小二乘所需点数对应时间取为5 ms。据此可以构造故障判据如下

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^H \Delta i_{cd}(k) d\Delta u_{cd}/dt(k)}{\sum_{k=1}^H [d\Delta u_{cd}/dt(k)]^2} < C_{set} \quad (7)$$

式中: H 为5 ms内的采样点个数; C_{set} 为设定的电容门槛值,一般取为 $[-800 \ 0]$ 。

由于在2.2节分析中,忽略了换流器分流 Δi_{sM} 、 Δi_{sN} ,使得发生区内故障时通过式(6)识别得到的电容 C_j 略小于 $-C_p$,这更有利于区内故障的判别。

算法具体实现过程为:利用差分法求取电压电流故障分量;用低通滤波器对电压电流故障分量滤波,提取低频分量;用最小二乘法识别出电容值,并与相应整定值比较,从而判别故障。

需要指出的是,本文线路用 π 模型等值电路,由于不同长度的线路等效为 π 模型等值电路时有一定的适用频带^[17],故需要低通滤波。

4 仿真实验

± 60 kV 双极 VSC-HVDC 输电系统仿真模型如图1所示,系统容量为60 MW,线路长度为300 km,用PSCAD进行电磁暂态仿真,采用MATLAB进行数据处理。

仿真中,线路采用频变参数电缆模型,具体线路结构和控制策略参见文献[9]。正、负极的并联大电容均取为 $1\ 000 \mu\text{F}$,数据采样率为10 kHz。系统在2.5 s时发生故障,故障持续时间为0.1 s。低通滤波器的截止频率为200 Hz,数据窗长取为5 ms,为了保证本保护在极端情况下不至于误动,动作门槛

值 C_{set} 设定为 -200 。本文仅给出了最不利于保护动作的故障条件下的仿真结果。

4.1 区内故障仿真结果

图 6 给出了区内正极距 M 端 30 km 处经 $300\ \Omega$ 过渡电阻发生故障时的仿真结果;图 7 给出了区内正极距 M 端 270 km 处发生金属性接地故障时的仿真结果。

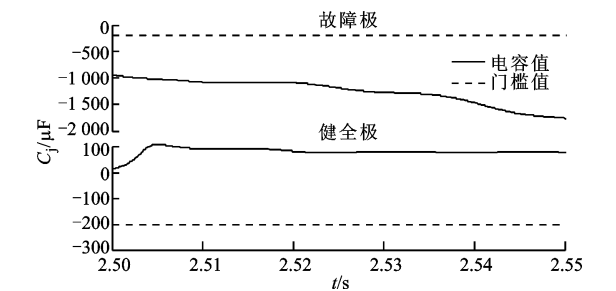


图 6 距 M 端 30 km 处经 $300\ \Omega$ 过渡电阻发生接地故障的仿真结果

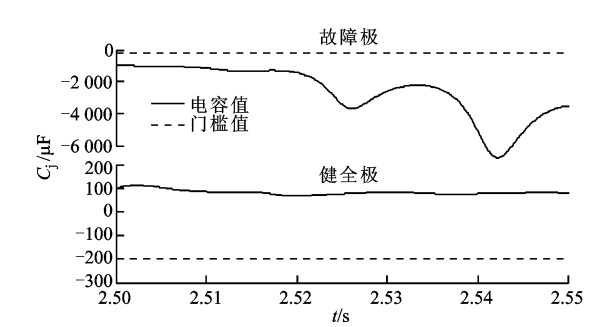


图 7 距 M 端 270 km 处发生金属性接地故障的仿真结果

由图 6、图 7 可知,直流输电线路在区内不同位置、发生不同过渡电阻故障时,对于故障极,识别出的电容 C_j 远小于门槛值 C_{set} ,在 10 ms 内即可准确判别故障;对于健全极,相当于外部故障,计算电容 C_j 远大于门槛值 C_{set} ,保护装置可靠不动作。

4.2 区外故障仿真结果

图 8 给出了 M 端区外直流线路发生金属性接地故障(对应图 1 中的 f_2)时的仿真结果;图 9 给出了 N 端区外交流线路发生金属性三相短路接地故障(对应图 1 中的 f_5)时的仿真结果。由图 8、图 9 可知,线路区外在不同位置、发生不同类型故障时,正、负极识别得到的电容 C_j 均远大于对应的门槛值 C_{set} ,保护可靠不动作。大量的仿真表明,直流线路区内发生故障时,保护装置均能在 10 ms 内可靠动作;线路区外发生故障时,保护装置均能可靠不动作。

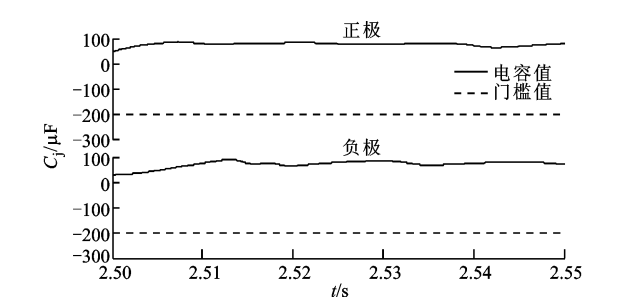


图 8 M 端区外直流线路发生金属性接地故障的仿真结果

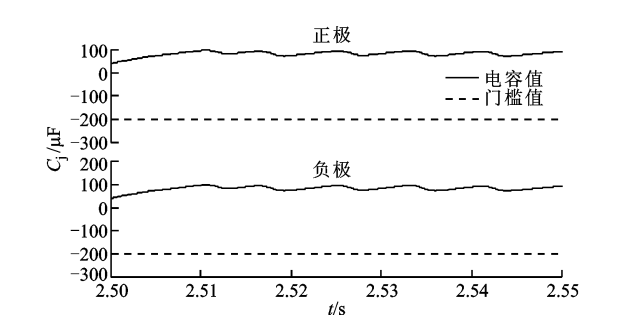


图 9 N 端区外交流线路发生金属性三相短路接地的仿真结果

5 结 论

(1)正电容模型反映了外部故障,负电容模型反映了内部故障。利用差动电流和差动电压计算得到的电容正负能够可靠快速地区分区内、外故障。

(2)发生外部故障时,计算得到的电容为输电线路对地电容,对于文中 300 km 电缆线路该电容约为 $80\ \mu\text{F}$;发生内部故障时,计算得到的电容为并联大电容的负值,在本文中为 $-1\ 000\ \mu\text{F}$,具有较高的灵敏度。

(3)故障极的区内故障,对于健全极为区外故障,计算得到的电容为正的线路对地电容,故本保护原理能分极动作。

(4)本文提出的利用识别得到的电容值的正负作为判据的保护新原理,无需补偿电容电流,原理简单、易于整定,具有绝对的选择性。仿真实验表明,该方法不受过渡电阻、故障位置和故障类型的影响,在各种工况下均能快速可靠地判别故障,具有一定的推广实用价值。

参考文献:

[1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京:水利电力出版社,1985:1-24.
[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, 2010:2-36.
- [3] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007,30(1):1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 30(1):1-10.
- [4] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003,27(4):77-80.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(4):77-80.
- [5] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新的直流输电技术:HVDC Light [J]. 电工技术学报, 2005,20(7):12-16.
HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. New high voltage direct current transmission technology: HVDC light [J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2005,20(7):12-16.
- [6] 国家电网公司. 浙江舟山将建世界首个“五端柔性直流示范工程”[EB/OL]. [2012-07-24]. <http://www.sgcc.com.cn/ztlz/newzndw/sdsf/07/277118.shtml>.
- [7] 韩明晓,文俊. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京:机械工业出版社, 2009:185-205.
- [8] 李爱民,蔡泽祥,任达勇,等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009,33(11):72-75.
LI Aimin, CAI Zexiang, REN Dayong, et al. Analysis on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(11):72-75.
- [9] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(22):105-111.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. A new current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line [J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(22):105-111.
- [10] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. 基于模型识别的 VSC-HVDC 直流输电线路方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(7):78-83.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Directional element for VSC-HVDC transmission lines based on model identification [J]. Power System Protection and Control, 2012,40(7):78-83.
- [11] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. 利用电流频率特性的 VSC-HVDC 直流输电线路纵联保护[J]. 高电压技术, 2011,37(8):1989-1996.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. New pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency characteristic of current [J]. High Voltage Engineering, 2011,37(8):1989-1996.
- [12] 索南加乐,杨钺,宋国兵,等. 模型识别用于继电保护的理論初探[J]. 电力系统保护与控制, 2010,38(24):23-28.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection based on model recognition [J]. Power System Protection and Control, 2010,38(24):23-28.
- [13] 索南加乐,杨钺,杨忠礼,等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008,32(24):30-34.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(24):30-34.
- [14] 索南加乐,邓旭阳,宋国兵,等. 基于模型参数识别的母线保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(22):92-99.
SUONAN Jiale, DENG Xuyang, SONG Guobing, et al. Model-parameter identification based bus-bar protection principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(22):92-99.
- [15] 索南加乐,陈福锋,齐军,等. 串补线路故障点位置的模型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(1):66-72.
SUONAN Jiale, CHEN Fufeng, QI Jun, et al. New method for identifying the fault location on series compensated lines based on different fault models [J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(1):66-72.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2007:2-45.
- [17] 康小宁,吴招座,索南加乐,等. 参数识别纵联差动保护应用中输电线路模型适用频带研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,39(19):8-16.
KANG Xiaoning, WU Zhaozuo, SUONAN Jiale, et al. Research of suitable frequency band of transmission line model applied to pilot differential protection based on parameter identification [J]. Power System Protection and Control, 2011,39(19):8-16.

(编辑 杜秀杰)