

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.013

交流串入直流电源系统正极或负极对 继电器的动作影响分析

黄晶晶, 徐强超

(广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: 交流串扰直流系统可能会引起保护误动, 尚缺乏完整的理论和仿真分析模型。建立了交流串入直流系统正极、负极的数学模型与仿真模型。通过对比数学公式计算、MATLAB 仿真、实际试验结果, 验证了理论分析与仿真模型的正确。分析和实验均证明了交流串扰直流系统正、负极两种情况下, 继电器线圈两端的电压与二次电缆分布电容、交流串扰电源正相关, 与限流电阻负相关。并提出了提高继电器动作功率、减小二次电缆分布电容、采用合适限流电阻、定期检查跳闸回路对地电容等防止交流串扰直流引起保护误动的措施。

关键词: 交直流串扰; 对地电容; 限流电阻; 防误动

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0071-04

Analysis on Relay Action Caused by AC-DC Interference to Positive or Negative Pole of DC System

HUANG Jingjing, XU Qiangchao

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

Abstract: AC-DC Interference can cause relay protection misoperation, it is still lack of workable theory and digital simulation models. In this paper, a theory analysis and digital simulation models of AC-DC Interference are proposed. The theory analysis and simulation models are proved correctly by experiment evaluation. The capacitance of cable to ground, resistance for current limit and AC interference voltage are the major factors to affect the voltage between the relay terminals. Finally, proposals of improving the relay action power, reducing the capacitance of cable to ground, choosing a reasonable resistance for current limit and checking the capacitance to ground regularly are presented.

Key words: Ac-Dc interference; capacitance of cable to ground; resistance for current limit; anti-misoperation

变电站的动力和电源系统包括交流系统和直流系统。交流系统主要用于照明、空调、电机等负荷较大且对供电可靠性要求不高的设备。直流系统则担负着为继电保护、监控系统、计量等二次设备以及断路器操作提供电源的重任。直流系统对变电站的安全稳定运行起着举足轻重的作用。在国内实际的电网运行中, 曾发生多起因为交流串入直流系统导致的继电保护误动及拒动的事故^[1-6]。文献[1]

从运行工况角度提出防止直流系统故障的措施, 但对直流系统故障原理并未进行分析。文献[2]从交流串入直流后导致的后果及针对保护开入回路提出了防范措施。文献[3-4]分析出由于电缆对地分布电容较大, 继电器动作功率低导致在交流串入直流系统时断路器跳闸。文献[5, 7-8]从不同角度论述了分布电容对交流串入直流系统的影响。从目前发表的文献来看, 尚缺乏一种完整的数学和仿真模型可以对交流串扰直流系统的各类情况进行综合分析, 因此十分有必要开展交流串入直流系统的理论和仿真模型研究。本文建立了交流串入直流系统的数学模型与仿真模型, 并进行了实际电路模拟试

收稿日期: 2016-06-01

作者简介: 黄晶晶(1983), 女, 福建福州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事继电保护及其自动化运行检修维护工作(e-mail) zhang@gedi.com.cn。

验,验证数学模型与仿真模型的准确性,并根据仿真和实验的结论,提出了防范措施与解决方法。

1 交流串入直流系统正、负极的原理分析

二次回路交流串入直流系统根据交流电源串入直流系统位置的不同可分为负极串入、正极串入、线圈串入三种类型。因篇幅关系,本文论述了从负极串入和正极串入两种类型。交流串扰源可用等效电源 U_s 表示, U_L 为直流电源, C_1 为直流系统电容, R_1 为直流系统平衡桥电阻, R 为限流电阻, L_J 、 R_J 分别为继电器等效电感和电阻, C 为二次电缆等效分布电容。继电器线圈可等效为由续流二极管、电感 L_J 、电阻 R_J 组成的电路模型、 U_d 为继电器线圈两端的电压, I_d 为流过续流二极管的电流, I_{ac} 为流过继电器线圈的电流。

1.1 负极串入

交流干扰从直流系统负极串入的模型如图1所示。

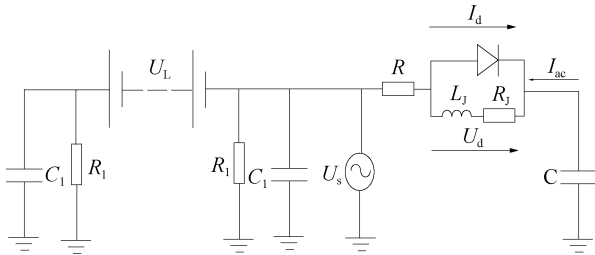


图1 直流电源负极串入交流的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of AC-DC Interference in negative pole of DC system

设继电器两端的电压为 U_d , 根据电路原理可知, 由于电容对直流来说相当于开路, 因此直流电源在继电器上的压降为零。因此, 仅考虑交流电源作用下, 继电器两端的电压值。根据叠加原理, 仅考虑交流电源作用下, 研究线圈两端电压的电路可表示为图2所示。

考虑到续流二极管的单向导通特性, 继电器线圈两端的电压 U_d 如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_s \leq 0, U_d = -U_s * \frac{R_J + wL_J * j}{R + R_J + wL_J * j - (1/wC) * j} \\ U_s > 0, U_d = 0 \end{cases} \quad (1)$$

1.2 正极串入

交流干扰从直流系统正极串入的模型如图3所示, 同理电容对直流来说相当于开路, 直流电源在

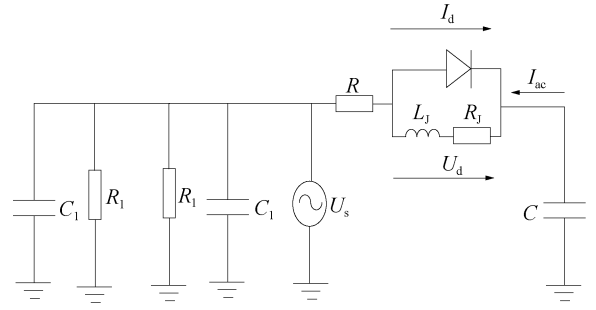


图2 仅考虑交流电源负极串入作用下继电器动作模型

Fig. 2 Equivalent circuit including only AC source

继电器上的压降为零。因此, 仅考虑交流电源作用下, 继电器两端的电压值。根据叠加原理, 仅考虑交流电源作用下, 直流电源 U_L 相当于短路, 研究线圈两端电压的电路可表示为图4所示。

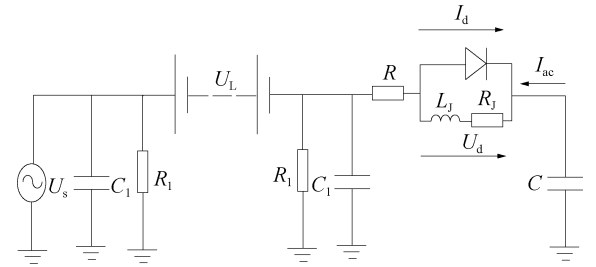


图3 直流电源正极串入交流的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of AC-DC Interference in positive pole of DC system

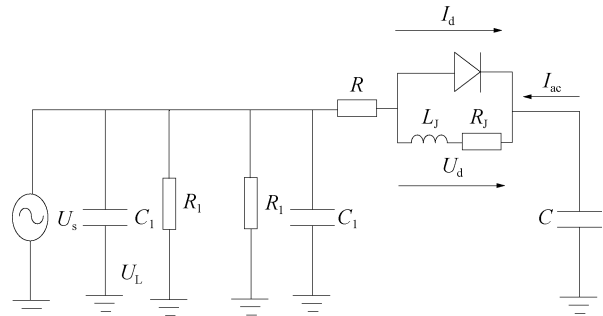


图4 仅考虑交流电源正极串入作用下继电器动作模型

Fig. 4 Equivalent circuit including only AC source

考虑到续流二极管的单向导通特性, 继电器线圈两端的电压 U_d 如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_s \leq 0, U_d = -U_s * \frac{R_J + wL_J * j}{R + R_J + wL_J * j - (1/wC) * j} \\ U_s > 0, U_d = 0 \end{cases} \quad (2)$$

从式(1)、式(2)可知, 对于特定电路和继电器, R_J 、 L_J 、 w 均为常数, 因此当负极或正极串入交流时, 决定继电器两端电压 U_d 的因素为二次控制电缆

的分布电容 C 、限流电阻 R 和串扰交流电源 U_s 。

根据继电保护反措要求, 继电器线圈两端的电压动作范围为 55% ~ 70%。因此可以通过将实际的参数带入式(1)、式(2), 计算求出负极或正极交流串扰后线圈两端的电压 U_d , 再跟继电器的动作

范围比较, 即可判断串扰是否会引起继电器误动。

2 仿真实验

2.1 仿真模型介绍

为验证以上原理分析和公式推导的正确性, 本

表 1 负极串扰计算、仿真及实验结果

Tab. 1 Results of calculation, simulation and experiment for AC-DC Interference to negative pole of DC system

	二次电缆分布电容 $C/\mu\text{F}$	等效串扰交 流电源 U_s/V	限流电阻 R $/\text{k}\Omega$	继电器两端电压 U_d		
				数学公式计算结果/ V	MATLAB 仿真结果/ V	实际试验/ V
C 变化对 U_d 的影响	0.1	86	20	10.500 0	10.5	09
	0.5	86	20	17.100 0	17.0	16
	1.0	86	20	17.450 0	18.0	18
	2.0	86	20	17.450 0	18.0	19
	4.0	86	20	17.470 0	18.0	19
U_s 变化对 U_d 的影响	1.0	76	20	15.421 7	15.5	15
	1.0	81	20	16.436 2	15.5	16
	1.0	86	20	17.450 8	17.0	18
	1.0	91	20	18.465 4	19.0	19
	1.0	96	20	19.480 0	20.0	21
R 变化对 U_d 的影响	1.0	86	18	19.139 2	19.5	21
	1.0	86	19	18.256 1	18.0	19
	1.0	86	20	17.450 8	17.0	18
	1.0	86	21	16.713 4	16.0	16
	1.0	86	22	16.035 8	15.2	15

表 2 正极串扰计算、仿真及实验结果

Tab. 2 Results of calculation, simulation and experiment for AC-DC Interference to positive pole of DC system

	二次电缆分布电容 $C/\mu\text{F}$	等效串扰交 流电源 U_s/V	限流电阻 R $/\text{k}\Omega$	继电器两端电压 U_d		
				数学公式计算结果/ V	MATLAB 仿真结果/ V	实际试验/ V
C 变化对 U_d 的影响	0.1	86	20	10.500 0	10.5	09
	0.5	86	20	17.100 0	17.0	16
	1.0	86	20	17.450 0	18.0	18
	2.0	86	20	17.450 0	18.0	19
	4.0	86	20	17.470 0	18.0	19
U_s 变化对 U_d 的影响	1.0	76	20	15.421 7	15.5	15
	1.0	81	20	16.436 2	15.5	17
	1.0	86	20	17.450 8	17.0	18
	1.0	91	20	18.465 4	19.0	19
	1.0	96	20	19.480 0	20.0	20
R 变化对 U_d 的影响	1.0	86	18	19.139 2	19.5	21
	1.0	86	19	18.256 1	18.0	19
	1.0	86	20	17.450 8	17.0	18
	1.0	86	21	16.713 4	16.0	16
	1.0	86	22	16.035 8	15.2	15

文在 MATLAB Simulink 中进行了数字模拟仿真,并且搭建了实际的物理电路模型进行了实验模拟。

2.2 仿真结果验证

2.2.1 负极串扰

表1列出了 C 、 R 和 U_s 分别变化时对 U_d 的影响。当二次电缆分布电容 C 增大时,继电器线圈两端的电压 U_d 随之增大。交流串扰电源 U_s 增大时, U_d 随之增大。当限流电阻 R 增大时, U_d 电压随之减小。并且从上表 U_d 的数值可以看出,理论计算、Matlab 仿真和电路实验的值基本相同,也验证了模型理论计算的正确性。

2.2.2 正极串扰

表2列出了 C 、 R 和 U_s 分别变化时对 U_d 的影响。当二次电缆分布电容 C 增大时, U_d 随之增大。交流串扰电源 U_s 增大时, U_d 随之增大。当限流电阻 R 增大时, U_d 电压随之减小。并且从上表 U_d 的数值可以看出,理论计算 Matlab 仿真和电路实验的值基本相同,也验证了模型理论计算的正确性。

3 交流串入直流正、负极防保护误动措施

从式(1)、式(2)可知,对于特定的电路和继电器, R_j 、 L_j 、 w 均为常数,因此当负极或正极串入交流时,决定继电器两端电压 U_d 的因素为二次控制电缆的分布电容 C 、限流电阻 R 和串扰交流电源 U_s 。

从表1和表2可以看出,继电器线圈两端的电压 U_d 与二次电缆分布电容 C 、交流串扰电源 U_s 正相关,与限流电阻 R 负相关。由于交流串扰电源的大小是不确定因素,因此减小二次电缆分布电容 C 和增大限流电阻 R 均可提高交流串扰时继电器的抗误动能力。

反过来,当已知继电器动作电压时,通过式(1)、式(2)可以推算提出对二次电缆分布电容 C 和限流电阻 R 的设计要求。

根据上述分析,在实际工程中,可以采取下列相应的措施消除或减少交流串入直流导致保护或断路器误动事故。

3.1 提高继电器动作功率

在跳闸回路中加装大功率继电器,提高继电器交流电压动作门槛。对于非电量及会引起多个断路器直接跳闸的中间继电器设计满足文献[10]的要求即可。但对于特别重要开关,可以考虑针对单个断

路器的跳闸继电器也按照该设计,但要考虑继电保护装置是否满足动作功率提高而引起的动作电流增大的要求。

3.2 减小二次电缆分布电容

二次电缆的分布电容主要受二次电缆的长度影响。因此合理进行电气总平面布置,使继电器室与断路器设备的距离在一定的范围内,有利于提高交流串扰时保护抗误动能力。比如对于敞开式配电装置(AIS)设备,采用继电器室下放布置。当继电器室必须集中布置时,采用封闭式组合电器配电装置(GIS)。或者对于超长距离的电缆,采用光纤传送跳闸信号以消除电缆的分布电容效应。

3.3 采用合适的限流电阻

在确定串扰交流电源、继电器的参数、动作电压、二次电缆分布电容等参数的情况下,通过式(1)、式(2)可求得存在交流串扰,防止继电器误动的限流电阻值范围,从而选择合适的电阻值防止继电器误动。

3.4 定期检查跳闸回路对地电容

对于正、负极串扰时,定期检查直接跳闸回路电缆的对地分布电容,一旦高于报警值,采取措施避免事故发生。考虑一定裕度,报警值可以取式(1)和式(2)计算出来的电容值的0.6倍。

4 结论

本文建立了交流串入直流系统正极、负极的数学模型与仿真模型,通过对比数学公式计算、MATLAB 仿真、实际试验结果,验证了理论分析与仿真模型的正确。分析了负极串扰、正极串扰两种情况下继电器线圈两端的电压,指出了影响继电器线圈两端电压的3个主要因素:二次控制电缆的分布电容 C 、限流电阻 R 和串扰交流电源 U_s 。并针对性的提出了实际工程中防止交流串扰直流引起保护误动的措施建议。

参考文献:

- [1] 唐文秀. 直流回路一点接地和交直流串扰引起保护误动及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 123-125.
TANG W X. Protection misoperations caused by single-point grounding of DC circuit and AC-DC interference and countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 123-125.

性能的要求,而且还能有效节约发电成本,改善海上平台对海洋环境的影响。因此,可以预见采用柔性直流输电技术对海上平台进行供电将发挥很好的经济效益和社会效益,为我国海上资源开发和沿海发展提供重要的助力。

参考文献:

- [1] 吴锋,胡辉,胡鹏,等.海上油气田电力组网技术研究与实践[J].中国海上油气,2010,22(1):54-58.
WU F, HU H, HU P, et al. Study and practice of power group network technology for offshore oil and gas fields [J]. China Offsh Ore Oil and Gas, 2010, 22(1): 54-58.
- [2] 李强,李鑫,魏澈.海上油气田群电力组网技术[J].中国造船,2011,52(7):218-223.
LI Q, LI X, WEI C. Power grid interlinking technology for offshore oil fields [J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(7): 218-223.
- [3] 董玉龙,胡兆庆,田杰,等.多端柔性直流控制保护系统架构和策略[J].南方能源建设,2016,3(2):21-26.
DONG Y L, HU Z Q, TIAN J, et al. Frame of control protection system and control strategy implement in Multi-terminal VSC-HVDC system [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 21-26.
- [4] 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,2010:72-76.
- [5] 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 G F, HE Z Y, PANG H. Research application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

- [6] 刘钟淇.基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统研究[D].北京:清华大学,2010.
- [7] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [8] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Z, XUE Y L, ZHANG Z R. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [9] 郑明.300 MW海上风电场电气主接线设计[J].南方能源建设,2015,2(3):62-66.
ZHENG M. Electrical single-line diagram design of a 300 MW offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 62-66.
- [10] 钟杰峰,陈丽萍,袁康龙,等.多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J].南方能源建设,2015,2(Supp.1):42-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (Supp. 1): 42-45.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第74页 Continued from Page 74)

- [2] 丁晓兵,赵曼勇,皮显松,等.防止交流串入直流导致母线保护误动的措施[J].电力系统保护与控制,2008,36(22):97-99.
DING X B, ZHAO M Y, PI X S, et al. Treatments to avoid misoperation of busbar protection when AC flows into DC circuit [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 97-99.
- [3] 曹景玉,郑文敬,田峰.交流混入直流引起开关跳闸的原因分析及防范[J].电力安全技术,2010,12(11):31-32.
- [4] 孟凡超,高志强,杨书东.交流串入直流回路引起开关跳闸的原因分析[J].继电器,2007,35(14):77-78.
MENG F C, GAO Z Q, YANG S D. Analysis of the tripping of the circuit breaker by the AC in the DC [J]. Relay, 2007, 36(22): 97-99.
- [5] 吴剑鸣,严正.控制电缆的分布电容对继电保护的影响及防范措施[J].电力自动化设备,2007,27(11):115-121.

WU J M, YAN Z. Influence of control cable distributing capacitance on protection and its countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 115-121.

- [6] 高旭,青桂仙,孙集伟,等.一起典型的500 kV失灵保护误动分析[J].电力系统自动化,2007,31(8):104-106.
- [7] 王振彦.直流接地引起断路器跳闸情况分析[J].上海电力,2001(1):15-16.
- [8] 周卫,杨理才.直流系统分布电容对断路器跳闸的影响分析[J].广西电力,2013,36(3):64-66.
ZHOU W, YANG L C. Influence of DC system distribution capacitance on breaker tripping [J]. GuangXi Electric Power, 2013, 36(3): 64-66.
- [9] 姜玉龙,贾晋,史凤娟.继电保护交直流串扰原因分析及解决措施[J].电工技术,2010(2):13-15.
- [10] 中国南方电网电力调度通信中心.南方电网继电保护通用技术规范[M].北京:中国电力出版社,2012.

(责任编辑 黄肇和)