

DOI: 10.7652/xjtuxb201701019

直驱风电场集电线保护研究

王小波¹, 宋国兵¹, 常仲学¹, 马志宾²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 广州供电局电力调度控制中心, 510000, 广州)

摘要: 针对传统三段式电流保护应用于风电场集电线时选择性和速动性不能兼顾的问题,在分析风电场集电线拓扑结构和故障特征的基础上,结合熔断器保护曲线和风机的低电压穿越特性,提出了一种能适用于风电场集电线的反时限电流保护新方法。以直驱风电场为对象,分析得出了传统三段式电流保护不适应于风电场集电线保护的结论,并且给出了新方法的整定原则,即根据熔断器下游经不同过渡阻抗故障后集电线电流与熔断器电流的最大差值关系得到集电线反时限电流保护的理论曲线,最后借助 EMTP-PSCAD 软件平台搭建直驱风电场模型对理论分析进行了验证。仿真结果表明,对于风电场集电线保护,反时限电流保护新方法由于采用了连续的电流保护曲线,能够很好地与熔断器保护相配合,克服了传统三段式电流保护范围小、易造成保护越级跳闸、风机脱网等缺点,而且有很强的抗过渡电阻能力,在不同的故障条件下能快速可靠地动作,兼顾了继电保护选择性和速动性的要求,因此具有一定的工程实用价值。

关键词: 直驱风电场;集电线;三段式电流保护;熔断器;反时限电流保护

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0122-06

Novel Protection of the Power Collecting Lines in PMSG Wind Farms

WANG Xiaobo¹, SONG Guobing¹, CHANG Zhongxue¹, MA Zhibin²

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

2. Guangzhou Power Supply Bureau Dispatch Control Center, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To enhance performance of traditional three-section overcurrent protection used in power collecting lines, a novel inverse-time overcurrent protection is proposed via analyzing the topology and faults characteristics of power collecting lines as well as the fuse protection features and PMSG's LVRT characteristics. Taking PMSG farm as the research object, traditional overcurrent protection is no longer applicable because it often causes small protection range, override trip and turbine tripping. The inverse-time overcurrent protection curve can be obtained according to the maximum current difference between power collecting lines and fuses. Finally the effectiveness of the novel protection is verified by simulations in EMTP-PSCAD environment. Results show that for power collecting lines, the novel protection approach overcomes the shortcomings of traditional methods and achieves better selectivity and speediness. In addition, it is insensitive to transient impedance, thus could be applied to engineering.

Keywords: PMSG wind farm; power collecting line; three-section overcurrent protection; fuse; inverse-time overcurrent protection

风电场集电线故障及保护问题作为风电涉网保护的重要组成部分,许多学者已进行了大量研究。文献[1-3]介绍了风电并网的新情况,研究了风机脱网的原因及对策;文献[4-6]说明了风电对配网继电保护的影响并对保护适应性进行了探讨;文献[7]以双馈风电场通过集电线并网为例,研究了具备低电压穿越能力的风机对集电线继电保护的影响,指出了集电线保护的整定原则;文献[8]提出在箱变高压侧加装断路器的思想并辅以完善的通信功能来提高集电线保护的选择性,但费用昂贵;文献[9]详细介绍了集电线的保护配置,但未考虑与其他元件保护的配合及风机低电压穿越特性。目前,对双馈风电场集电线保护研究较多,缺乏对直驱风机短路特性及并网保护的深入研究。

本文以直驱风电场为例,分析了风电场集电线的拓扑结构和故障特征,得出传统三段式电流保护不能兼顾选择性、速动性的结论,并结合箱变支路熔断器保护曲线和风机的低电压穿越特性,提出了一种反时限电流保护新方法。

1 集电线结构与故障特征

1.1 风电场集电线系统结构

风电场和集电线系统的基本结构如图 1 所示。风机通过箱变、熔断器接入集电线,有对应的涉网保护策略,熔断器作为箱变的主保护,保护曲线为反时限曲线,如图 2 所示。

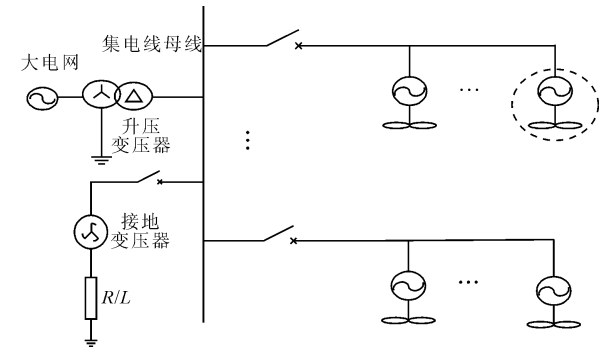


图 1 风电场和集电线系统拓扑结构

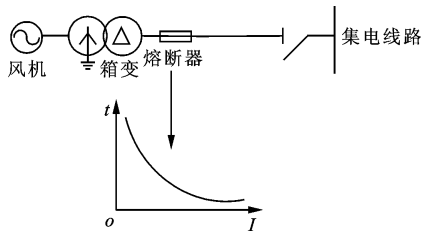


图 2 风机接入集电线示意图

1.2 集电线故障特征分析

根据《GB/T19963—2011 风电场接入电力系统技术规定》的标准,电网故障期间,风机的低电压穿越电流、电压约束方程为

$$\left. \begin{aligned} (I_p^2 + I_q^2)^{1/2} &\leq 2^{1/2} I_N \\ I_q &= 0, U \geq 0.9 U_N \\ I_q &= 1.5 I_N \left(0.9 - \frac{U}{U_N} \right), 0.2 U_N < U < 0.9 U_N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据风电场集电线结构搭建 50 MW 的直驱风电场,包含 3 条集电线路,编号为 1~3,1、2 为电缆线路,3 为架空线,长度均为 4 km,详细参数参考文献[10]。每条集电线路连接 11 台 1.5 MW 的直驱风机,直驱风机网侧采用典型的双闭环控制策略^[11-12],并考虑式(1)的约束条件。在集电线 2 中点设置三相短路故障和相间短路故障,仿真得到故障线路 2 和非故障线路 1、3 的三相电流波形如图 3、4 所示,其中电流为标么值。

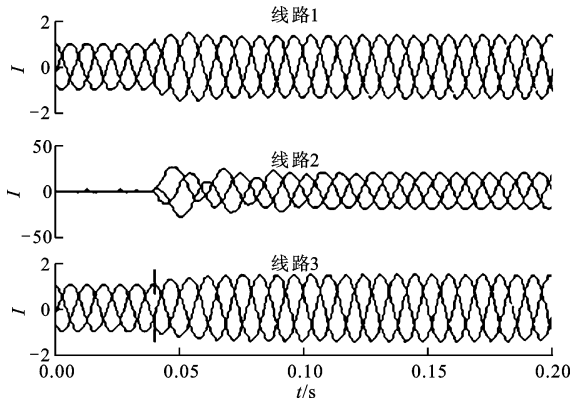


图 3 三相故障时电流波形

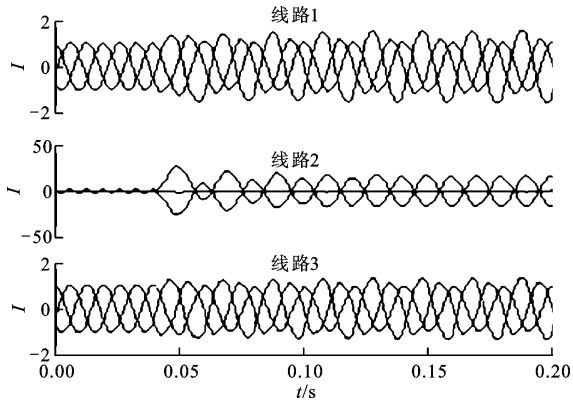


图 4 相间故障时电流波形

集电线发生故障时,非故障线路电流不超过 $2^{1/2}$ 倍的额定电流,而故障线路的短路电流远大于线路的额定电流,这是因为故障电流由系统和非故障线路共同提供,且系统电流占绝对主导。

2 传统三段式电流保护的适用性分析

集电线下游连接风机箱变支路,支路的保护元件是熔断器,熔断曲线是反时限的。集电线保护整定需要考虑相间或者三相故障切除的快速性,同时要兼顾与熔断器保护的配合。

传统三段式电流保护 I 段的整定原则是按照躲开线路末端箱变高压侧三相故障进行整定,不考虑风机箱变支路接入的影响,此时 I 段整定值表示为

$$I_{s1}^I = K_r^I \frac{E_\varphi}{Z_{s,min} + Z_L} \tag{2}$$

式中: E_φ 、 $Z_{s,min}$ 、 Z_L 分别为系统侧等效的相电动势、系统最大运行方式下的阻抗以及集电线阻抗; K_r^I 为可靠系数,一般取 1.2~1.3。

这样整定带来的问题是:集电线本身很短,I 段保护几乎没范围;风机箱变高压侧故障与集电线故障无法区分,集电线会越级跳闸,熔断器和集电线保护不能配合;I 段保护范围外故障会造成非故障线路上的风机脱网。因为 I 段范围外近端故障近似于母线故障,非故障线路的风机电压可能跌至 0.2 倍额定电压以下而脱网,同时 II 段的延时动作也可能造成风机脱网,示意图如图 5 所示。

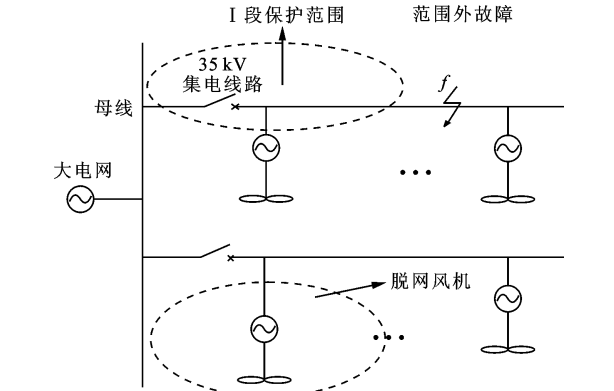


图 5 保护范围外故障风机脱网示意图

为了验证所述问题的可能性,进行了仿真测试,在集电线路 2 上每隔 100 m 设置故障点,仿真三相短路故障,测量故障线路 2 的故障电流以及非故障线路 1、3 首端连接风机机端残压,如表 1 所示,其中

表 1 故障线路电流与非故障线路首端风机残压

故障点距母线的距离/km	故障线路电流/kA	首台风电机端残压	
		线路 1	线路 3
4	5.17	0.241	0.231
3	5.27	0.198	0.198
2	5.41	0.147	0.148
1	5.51	0.089	0.089

机端残压为标么值。
当可靠系数 K_r^I 取下限值 1.2 时求得 I 段保护定值 $I_{s1}^I=5.35$ kA。当集电线路发生三相故障时,速断 I 段的保护范围很小。速断段外故障时,需要由时限较长的保护 II 段跳闸,且非故障线路靠近汇流母线的风机的机端电压也会降到 0.2 倍额定电压之下,造成非故障线路上风机脱网。若扩大保护范围,保护范围内箱变故障会造成集电线越级跳闸,即此时上下级元件保护的选择性配合不能保证。

3 反时限电流保护整定策略

为达到集电线保护与熔断器配合的目的,提出反时限的集电线电流保护更容易与熔断器配合,选择性和快速性都能达到优化的效果。

3.1 集电线和熔断器电流关系分析

熔断器下游故障时的电流分布图如图 6 所示。

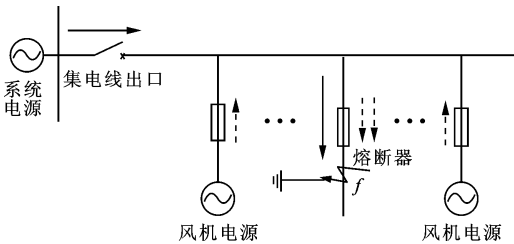
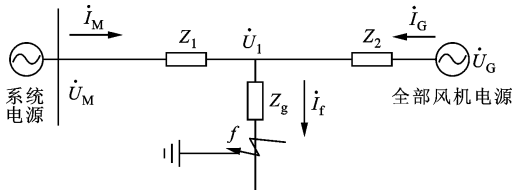


图 6 熔断器下游故障电流分布示意图

考虑到故障发生时风机对故障处的电流有助增作用,因此为了进一步分析集电线保护与熔断器保护的配合,需分析熔断器下游故障时,熔断器处电流与集电线出口处电流的关系。为分析方便,将图 6 等效为图 7 所示的电路图。由图 7 可知,电流满足

$$i_f = i_G + i_M \tag{3}$$

但 i_M 和 i_f 的关系依据 Z_g 的性质而定,为分析方便,假定 Z_g 为纯阻性或者纯感性的,即为 R_g 或者



$\dot{U}_1$:故障点的电压; $\dot{i}_f$:故障电流; Z_g :过渡阻抗; $\dot{U}_G$:非故障风机等效电源的电压; $\dot{i}_G$:非故障风机等效电源的电流; Z_2 :风机等效电源与故障点间的等效阻抗; $\dot{U}_M$:集电线出口处系统等效电源的电压; $\dot{i}_M$:集电线出口处系统等效电源的电流; Z_1 :集电线出口处与故障点间的等效阻抗

图 7 熔断器下游故障等效网络示意图

X_g ,下面针对 R_g 或者 X_g 进行分类讨论。

当 R_g 很小时,流入故障点的为有功电流 $\dot{I}_f$,系统电源和风机电源提供的电流为 $\dot{I}_M$ 和 $\dot{I}_G$,且 $I_M \gg I_G$ 。根据风机低电压穿越发出无功电流的约束条件可认为, $\dot{I}_G$ 滞后 $\dot{U}_G$ 约为 45° ,而 $\dot{U}_M$ 、 $\dot{U}_G$ 均超前 $\dot{U}_1$,如图 8 所示,此时 $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_G$ 夹角近似 45° ,熔断器的电流 $I_f > I_M$ 。

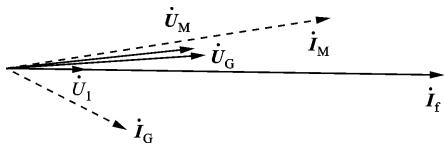


图 8 小电阻性故障时相量图

随着 R_g 增大,故障点电压升高, $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_G$ 均减小, $\dot{I}_G$ 变化不大且与 $\dot{U}_G$ 的夹角和故障点电压跌落程度有关,而 $\dot{I}_M$ 会减小; R_g 继续增大,集电线出口潮流会反向,之后会出现 $\dot{I}_M$ 增大, $\dot{I}_f$ 减小,直至最终 $\dot{I}_f$ 近似为 0,相当于故障点开路, $\dot{I}_M$ 近似为负荷电流,如图 9 所示。由图可以看出,仅当潮流反向后才会出现 $I_M > I_f$,此时 I_M 不超过风机提供的最大电流,集电线保护不会动作,此阶段可认为与未发生故障的情况接近,因此可以认为 $I_f > I_M$ 。

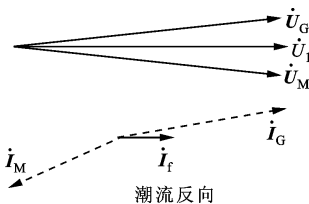


图 9 经高阻故障时相量图

当 X_g 很小时,故障点为无功电流 $\dot{I}_f$,系统电源和风机电源提供电流 $\dot{I}_M$ 和 $\dot{I}_G$,且 $I_M \gg I_G$, $\dot{I}_G$ 滞后 $\dot{U}_G$ 近似 45° , $\dot{I}_M$ 滞后 $\dot{U}_M$ 近似 90° ,如图 10 所示,此时 $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_G$ 夹角近似 45° ,电流满足 $I_f > I_M$ 。

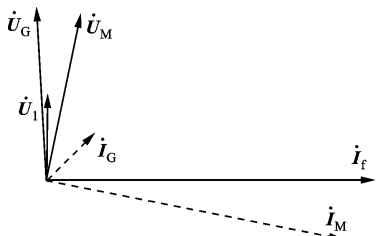


图 10 经小电感故障时相量图

随着 X_g 增大,故障点电压升高, $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_G$ 均减小, $\dot{I}_G$ 变化不大但其中的无功分量会减小, $\dot{I}_M$ 会减

小但不会减小至 0,此时 $\dot{I}_M$ 中包含故障点的无功电流和风机提供的有功电流,因此熔断器的电流将小于集电线出口电流,即 $I_M > I_f$ 。此时, $\dot{I}_G$ 、 $\dot{I}_f$ 近似为 90° ,电压、电流相量图如图 11 所示,熔断器下游故障时集电线功率流向示意图如图 12 所示。

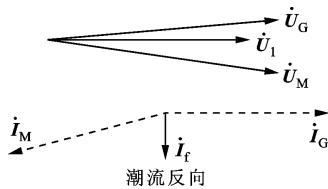


图 11 经大电感故障时相量图

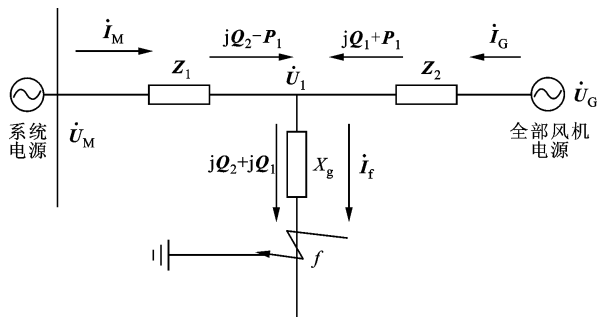


图 12 熔断器下游故障时集电线功率流向示意图

考虑极端情况,风机提供最大有功电流 $1.414I_N$, X_g 所有无功电流都由 $\dot{I}_M$ 提供,此时 I_M 、 I_f 存在最大差值,且近似有关系式

$$\left. \begin{aligned} I_M &= (I_{MQ}^2 + 2I_N^2)^{1/2} \\ I_f &= I_{MQ} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为验证集电线电流 I_M 与熔断器电流 I_f 之间的最大差值关系的正确性,可得

$$\left. \begin{aligned} I_M &= \frac{(P_1^2 + Q_2^2)^{1/2}}{U_1} \\ I_f &= \frac{Q_1 + Q_2}{U_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

推导不等式

$$\begin{aligned} I_M - I_f &\leq \left(\left(\frac{Q_2 + Q_1}{U_1} \right)^2 + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \right)^{1/2} - \\ &I_f \leq (I_f^2 + 2I_N^2)^{1/2} - I_f \end{aligned}$$

由此验证了式(4)表示的集电线电流与熔断器电流之间最大差值的正确性。在熔断器下游发生金属性、经高阻、经小电感故障时,熔断器处电流大于集电线处电流,而在经大电感故障时,会出现熔断器处电流小于集电线处电流的情况。

3.2 集电线反时限保护整定

假设集电线反时限保护曲线与熔断器保护曲线重合,即保护特性完全一致,根据反时限特性可知:

熔断器下游发生故障后,如果集电线电流小于熔断器电流,那么熔断器熔断时间小于集电线保护动作时间,熔断器将会首先动作,选择性得到满足。熔断器下游经大电感故障时,会出现集电线电流大于熔断器电流的情况,且两者最大差值满足式(4),这对集电线保护和熔断器保护的配合是最不利的。考虑此最不利条件,在已知熔断曲线情况下将熔断器电流代入式(4),即可得集电线保护电流时间曲线。

考虑 10% 的误差、10 ms 的熄弧时间,可得熔断器熔断曲线如图 13 所示。考虑电流互感器和非周期分量的影响,将由式(4)求得的集电线电流扩大 1.2 倍即可得到如图 13 所示的集电线保护曲线。在此基础上可取集电线保护的最短时间为 40 ms,如 BC 段所示,BC 段对应的短路电流为 3~4 倍集电线额定电流 I_N ,而一般故障电流远远大于 $4I_N$,可以保证在 40 ms 内切除故障,同时确保集电线保护曲线的动作电流大于 $1.5I_N$ 。由低电压穿越的约束条件可知,这样做可以保证反向区外故障时能够可靠不误动。

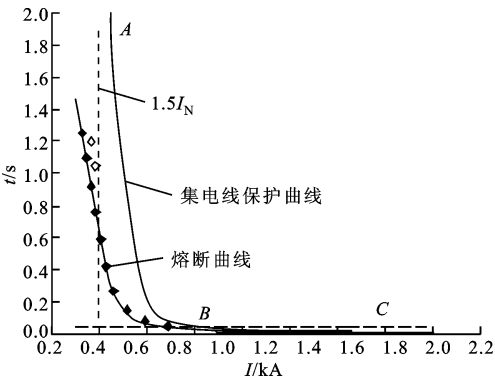


图 13 反时限电流整定曲线

4 保护性能仿真实验

4.1 选择性验证

为了验证经电阻故障时反时限电流保护的选择性,仿真集电线 2 末端不同过渡电阻下三相短路故障和相间短路故障时反时限保护和熔断器保护的之间选择性,仿真结果如表 2 所示。对经电感故障进行验证,用等效感抗来仿真模拟箱变内的三相、相间短路故障,仿真结果如表 3 所示。

由表 2 可知,经电阻故障且电阻较小时,集电线电流小于熔断器处电流;潮流反向后集电线电流才会大于熔断器电流,但此时集电线电流不会超过 $2^{1/2}$ 倍额定电流,集电线保护不会反向误动,验证了

对阻性故障分析的正确性。由表 3 可知,经电感故障且电感较小时,集电线出口电流小于熔断器电流,随着电感增大,会出现集电线出口电流大于熔断器电流,验证了对感性故障分析的正确性,且此时集电线保护与熔断器保护之间的选择性均满足要求。

表 2 经电阻故障时反时限电流保护的正确选择性能

故障类型	过渡电阻/ Ω	熔断器保护		集电线反时限保护	
		I/kA	t/s	I/kA	t/s
三相短路	10	3.974	0.010	3.663	0.040
	20	2.588	0.010	2.284	0.040
	50	1.172	0.010	0.895	0.040
	75	0.824	0.031	0.617	0.312
	150	0.403		0.129	
	750	0.099		0.186	
相间短路	10	2.659	0.010	2.322	0.040
	20	1.556	0.010	1.273	0.040
	50	0.808	0.027	0.620	0.263
	75	0.466		0.263	
	150	0.231		0.148	
	500	0.149		0.215	

表 3 经电感故障时反时限保护的正确选择性能

故障类型	箱变故障位置	熔断器保护		集电线反时限保护	
		I/kA	t/s	I/kA	t/s
三相短路	箱变 10%	2.588	0.010	2.468	0.040
	箱变 20%	1.470	0.015	1.411	0.040
	箱变 40%	0.855	0.023	0.854	0.047
	箱变 60%	0.606	0.085	0.629	0.261
	箱变 80%	0.466	0.331	0.540	0.952
	箱变末端	0.408	0.752	0.519	1.099
相间短路	箱变 10%	2.217	0.010	1.966	0.040
	箱变 20%	1.327	0.018	1.366	0.040
	箱变 40%	0.751	0.035	0.815	0.056
	箱变 60%	0.527	0.168	0.623	0.283
	箱变 80%	0.436	0.495	0.564	0.782
	箱变末端	0.362	1.077	0.486	1.512

4.2 快速性验证

仿真线路 2 末端经不同过渡电阻发生三相、相间短路故障,比较不同保护方案的故障切除速度,也即快速性,仿真结果如表 4 所示。

表 4 保护切除速度性能对比

故障类型	过渡电阻/ Ω	I/kA	t/s
三相短路	10	3.66	0.04
	25	1.86	0.04
	50	0.89	0.05
相间短路	10	2.32	0.04
	25	1.08	0.04
	50	0.62	0.26

5 结 论

传统三段式电流保护应用于风电场集电线会产生诸多问题,不能保证选择性和速动性等继电保护的基本要求。本文通过分析直驱风电场集电线系统的拓扑结构、集电线故障特征以及三段式电流保护的适应性,提出了一种应用于直驱风电场内集电线保护的整定方法,通过理论分析和仿真验证得到如下结论:

(1)应用三段式电流保护的直驱风电场集电线发生故障,会造成非故障线路风机脱网,对电力系统的稳定不利;

(2)结合集电线系统的拓扑机构和风机低电压穿越约束条件,可得出熔断器下游故障后集电线电流与熔断器电流的最大差值关系式,以此为据便得到集电线反时限保护曲线;

(3)集电线反时限保护曲线连续,可以充分兼顾保护动作的选择性和快速性,较三段式电流保护有更优良的性能。

参考文献:

[1] 戴慧珠,王伟胜,迟永宁. 风电场接入电力系统研究的新进展 [J]. 电网技术, 2007, 31(20): 16-23.
DAI Huizhu, WANG Weisheng, CHI Yongning. Recent wind power integration study in China [J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 16-23.

[2] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述 [J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-200.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-200.

[3] 何世恩,董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对

策 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
HE Shien, DONG Xinzhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.

[4] 张保会,郭丹阳,王进,等. 风电接入对继电保护的影响: 风电分散式接入配电网对电流保护影响分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 1-6.
ZHANG Baohui, GUO Danyang, WANG Jin, et al. Impact of wind farm integration on relay protection: impact of wind farms dispersedly connected to distribution network on current protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 1-6.

[5] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网保护的影响与对策 [J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.
YANG Guosheng, LI Xin, ZHOU Zexin. Impacts of wind farm on relay protection for distribution network and its countermeasures [J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 87-91.

[6] 文玉玲,晁勤. 关于风电场适应性继电保护的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.
WEN Yuling, CHAO Qin. Study on adaptive protection of wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 47-51.

[7] 隆贤林. 低电压穿越对风电场线路保护整定的影响 [J]. 内蒙古电力技术, 2011, 29(2): 8-12.
LONG Xianlin. Influence to wind power farm line protection setting due to low voltage ride-through [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(2): 8-12.

[8] 赵忠立. 提高风电场集电线路保护选择性的方案探讨 [J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(4): 35-38.
ZHAO Zhongli. Scheme for improving protection selectivity of wind farm transmission line [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2012, 30(4): 35-38.

[9] 孟钰娟. 某风电场集电线路继电保护的研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013: 5-16.

[10] 李广. 配电网单相接地故障区段定位的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2012: 18-29.

[11] 汪令祥. 永磁同步直驱型全功率风机变流器及其控制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011: 1-8.

[12] 李惟卫. 永磁直驱式风力发电系统并网逆变器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 12-24.

(编辑 赵炜)