

同杆并架输电线路的停运线路合闸 EMTDC 仿真分析

余涛, 叶文加, 梁海华

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 同杆并架输电线路的停运线路由于存在与其他运行线路的电磁耦合, 在合闸时将产生较大冲击电流和感应电流。应用 EMTDC 搭建同杆并架双回及多回线路模型, 通过对停运线路的合闸过程进行仿真, 研究线路长度、负载功率和塔型等因素对合闸的影响。结果表明, 冲击电流主要与负载功率相关, 稳态感应电流主要与线路长度相关, 同杆并架多回线路比双回线路具有更大合闸电流。

关键词: 同杆并架输电线路; 电磁耦合; 数字仿真; EMTDC; 冲击电流; 感应电流

EMTDC simulation of outage line closing for transmission circuits lines parallel connection on single tower

YU Tao, YE Wen-jia, LIANG Hai-hua

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Due to the electromagnetic coupling from the other operating lines, the inrush and induced currents on outage line will be excited when switch is closed. In order to study how the related factors such as length of parallel lines, load power, tower type, etc influence the switch closing, this paper builds double circuit and multi-circuit on the same tower models by EMTDC and simulates the closing process of outage lines. The results show that the inrush currents are mainly related to load power, the induced currents are mainly related to line length, and the inrush and induced currents are larger on the multi-circuit lines than on the double-circuit lines.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807016) and Natural Science Foundation of Guangdong Province(No. 9151064101000049).

Key words: transmission circuits lines parallel connection on single tower; electromagnetic coupling; digital simulation; EMTDC; inrush current; induced current

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0159-06

0 引言

同杆并架输电线路是有效利用线路走廊用地、提高输电容量、降低电力建设成本的一种有效方法。这种输电方式在我国日益增多。过去, 电力系统输电网络都是由单回传输线构成的, 随着社会的发展、电力负荷不断增大, 现代电力系统的发展需要将大容量的电能输送到负荷中心, 同时用电企业对电网的输电能力提出了更高的要求, 这就需要扩大电网的规模, 大量兴建高压输电线路以增大传输功率, 加强系统之间的联系。然而, 电网规模的扩大, 势必要增加传输线的数量, 占用更多的出线走廊, 花费巨大的人力物力, 而同杆并架输电线路的出现很

好地缓解了这个矛盾^[1-3]。

提高单位线路走廊宽度的输电能力目的是在不提高输电电压等级条件下, 提高现有三相线路的输电能力和节约线路走廊占地, 大幅度提高单位走廊宽度的利用率^[1-2], 同杆并架传输线路具有输送能力大, 稳定储备高, 工程造价低, 出线走廊宽度小, 占地面积少, 建设周期短等优点, 这种输电方式不仅可以大大降低电网的固定投资, 而且可以提高电网输电的安全性与稳定性, 满足现代社会对电能质量越来越高的要求。

在同杆并架线路的运行中, 可能会出现一回线路运行, 另一回线路停电检修的情况。由于线路之间存在着静电耦合及电磁耦合, 在检修回路上会产生感应电压和感应电流^[4-7]。因此, 计算分析运行回路在停电检修回路上的感应电压和电流, 对于同杆并架线路的检修和维护是十分重要的。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50807016); 广东省自然科学基金项目 (9151064101000049)

感应电压和电流分为电磁感应电压和静电感应电压 2 种^[8]。当导线流过交流电流时,在其周围产生一个交变磁场,如停电线路与其交链,则会在停电线路上感应出一个纵电势,沿导线方向分布,且根据停电导线对地绝缘程度的不同而对应于不同的对地电位。这种由于停电导线与带电导线之间的互感效应而产生的磁耦合的结果称为电磁感应,其大小决定于电流产生磁场的强弱。由于停电导线与带电导线之间存在的电容耦合效应,依靠带电导线电压产生的电场,使停电导线感应出一定的对地电位,称为静电感应^[9]。

在杆塔结构越来越复杂、同杆并架线路越来越密集的情况下,要通过理论计算来分析同杆并架线路的各种暂态过程和感应电压及电流将会异常困难,有必要通过仿真分析来给工程应用提供依据。本文对停运线路的合闸操作进行仿真分析,从而为合理安排运行方式提供理论依据,进一步提高驾驭大电网的能力,降低电网运行操作的风险,提高电网运行的可靠性。

1 同杆并架输电线路物理模型

图 1 所示为 110 kV 同杆并架输电线路模型,首端电源选取 110 kV 恒压源,末端选取负载模型,Z 选取分布线路参数模型。导、地线分别用 LGJX-300、GJ-50。本文模拟 I 回线路正常运行,II 回线路停运,再进行 II 回线路的末端合闸仿真。

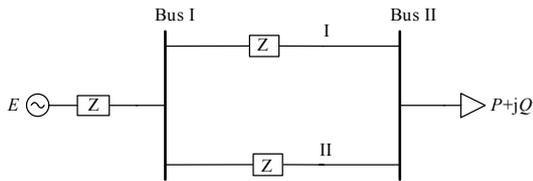


图 1 同杆并架双回线路模型

Fig.1 Model of double circuit lines parallel connection on single tower

图 2 所示为杆塔模型,分别有同塔双回杆塔和同塔多回杆塔的结构示意图。图中 1、2、3、4 表示回路,A、B、C 表示同一回路的三相。以同塔双回杆塔为例进行说明,从地面到最底层的导线 1C(或 2c)的高度为呼称高,最底层导线到杆塔顶上的地线 D(或 d)距离为地线高度,I 回和 II 回导线间的距离 Aa、Bb、Cc 为回路间距离,同一回线路的 AB、BC(或 ab、bc)的距离为相间距离。

本文第 3 部分的仿真分析采用的同塔双回线路有鼓型和伞型各两种,Bb>Aa=Cc 的为鼓型结构,Aa<Bb<Cc 的为伞型结构,各型具体参数如下:

鼓型 1: 呼称高 15 m,地线高度 10 m,Aa=Cc=6 m,Bb=7 m,AB=BC=3.5 m。

鼓型 2: 呼称高 15 m,地线高度 10.5 m,Aa=Cc=5 m,Bb=6.4 m,AB=BC=3.5 m。

伞型 1: 呼称高 20 m,地线高度 17.5 m,Aa=13 m,Bb=15.8 m,Cc=18.6 m,AB=BC=5 m。

伞型 2: 呼称高 18 m,地线高度 11.5 m,Aa=7.8 m,Bb=8.8 m,Cc=9.8 m,AB=BC=3.75 m。

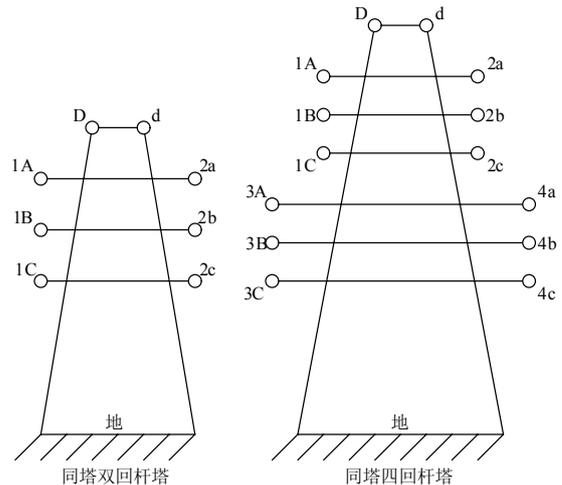


图 2 杆塔结构模型

Fig.2 Model of tower structure

另外同杆并架多回线路采用的杆塔模型如图 2 所示,其中呼称高 15 m,地线高度 20 m,上层两回导线 AB=BC=3.5 m,Aa=8 m,Bb=9 m,Cc=10 m;下层两回导线 AB=BC=4 m,Aa=13 m,Bb=15 m,Cc=17 m。

同杆并架多回输电线路的电磁感应是运行线路的负载电流通过线间互感所引起的^[10],双回线电感耦合传递回路如图 3 所示。根据理论分析,感应电动势表示为:

$$E = \frac{\omega MIU}{2Z_{cl}}$$

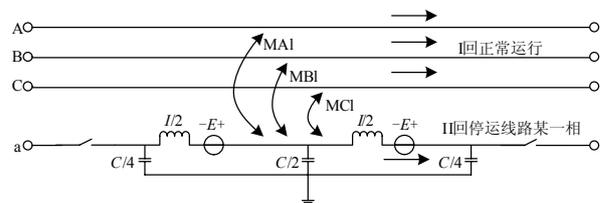


图 3 双回线电感耦合传递回路

Fig.3 Double circuit lines inductively coupled circuit

2 EMTDC 模型搭建

本文仿真采用 EMTDC 的 Tline 工具箱,选中线路模型如图 4 所示。输入基本参数如线路名称、

基频、线路长度、导线数目和连接方式等。

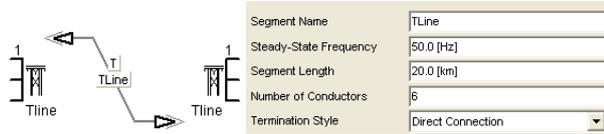


图 4 架空线路模型

Fig.4 Transmission lines model

利用 Tline 内部模块选取线路参数模型, 可选 Bergeron Model 以及 Frequency Dependent Model, 其中 Bergeron Model 适用于简单的频率恒定的传输线路, 而 Frequency Dependent Model 比 Bergeron Model 更适用于较复杂的暂态过程仿真, 所以本文采用 Frequency Dependent Model。

杆塔模型的参数也在 Tline 内部模块中输入, 如图 5 所示, 以鼓型同塔双回线为例。改变塔型如同塔三回或四回, 在 7~12 号导线处输入即可。

Tower: 鼓型				Tower Centre 0 [m]			
Conductors:				Ground_Wires:			
Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	1	-5 [m]	30 [m]	1	Eliminated	-2.5 [m]	40 [m]
2	2	0 [m]	30 [m]	2	Eliminated	2.5 [m]	40 [m]
3	3	5 [m]	30 [m]				
4	4	10 [m]	30 [m]				
5	5	15 [m]	30 [m]				
6	6	20 [m]	30 [m]				
7	7	0	0				
8	8	0	0				
9	9	0	0				
10	10	0	0				
11	11	0	0				
12	12	0	0				

图 5 杆塔模型导线参数

Fig.5 Conductor parameters of tower model

建立 Tline 架空线外部的电气连接如图 6 所示, 本文主要研究当 I 回线路正常运行时, II 回停运线路的合闸暂态过程和产生的感应电流。

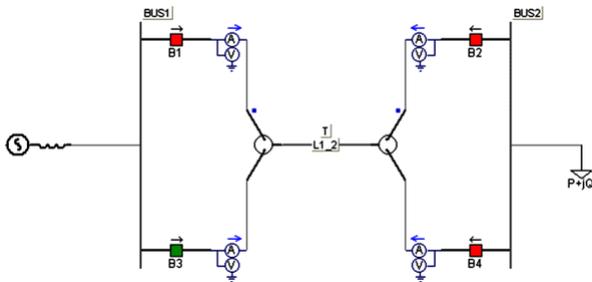


图 6 架空线路外部电气连接

Fig.6 Electrical connection of transmission lines

3 仿真分析

图 7 所示为停运线路末端刀闸开关合闸的电流波形图, 在总计 0.15 s 的仿真时段内, 当 0.1 s 时停运线路末端通过刀闸开关合闸, 可见出现了一个大于 100 A 的瞬时冲击电流, 合闸后, 停运线路上出

现稳态感应电流。

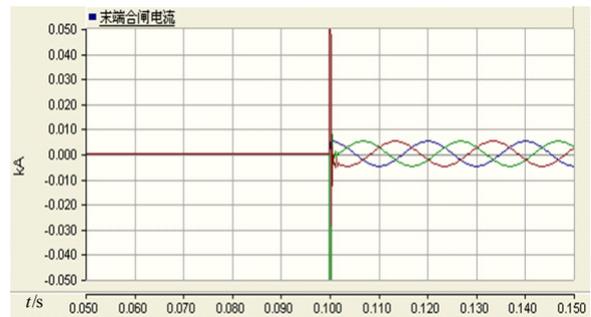


图 7 末端合闸过程示意图

Fig.7 Processing of outage line closing on terminal

根据相关文献, 影响停运线路感应电流的主要因素有: 线路运行状况、线路长度、相间和回路间距离等^[11-14]。以下通过图表形式对相关因素进行分析, 并给出各种因素影响下的电流统计结果。

3.1 线路长度和负载功率对合闸冲击电流和稳态感应电流的影响

表 1 以鼓型 1 的杆塔为例, 分别改变运行线路的负载功率和平行线路的长度, 得出停运线路合闸过程的电流数据统计结果, 图 8 和图 9 分别作出了合闸冲击电流和稳态感应电流的相关曲线。由图可得, 合闸冲击电流随负载增加的幅度较大, 随线路长度增加的幅度较缓; 而稳态感应电流随线路长度增加的幅度较大, 随功率增加的幅度较小。

表 1 同杆并架双回线路的停运线路末端合闸冲击电流和稳态感应电流

Tab.1 Inrush current and induced current of outage line closing on terminal

合闸冲击电流 / A				
	1 km	10 km	20 km	30 km
10 MW	111.51	112.42	113.44	114.56
20 MW	121.67	122.62	124.18	125.40
30 MW	130.71	131.52	132.79	133.91
40 MW	137.58	138.42	139.79	141.01
50 MW	143.76	144.58	145.71	146.81
稳态感应电流 / A				
	1 km	10 km	20 km	30 km
10 MW	3.655	3.716	5.002	7.742
20 MW	3.728	3.790	5.102	7.831
30 MW	3.838	3.902	5.252	7.893
40 MW	3.907	3.983	5.352	7.964
50 MW	3.984	4.105	5.452	8.288

另外根据刀闸开关合闸的安全性要求, 感应电流大于 5 A 的是不能进行合闸的, 由图可知线路长

度超过 18 km 的停运线路均不能采用刀闸开关进行合闸操作。

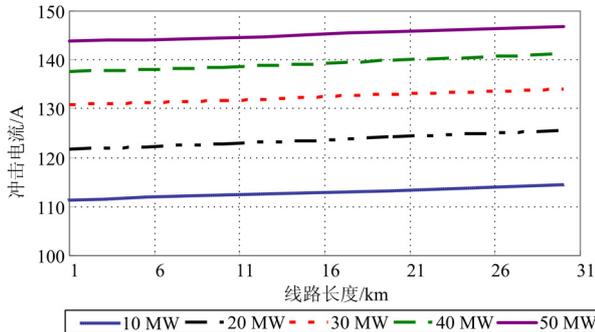


图 8 同塔双回路停运线路的合闸冲击电流在不同负载功率下随线路长度的变化关系

Fig.8 Variation of inrush current with increasing line length on different load

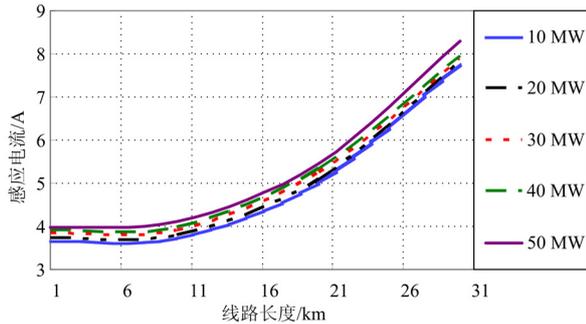


图 9 同塔双回路停运线路的稳态感应电流在不同负载功率下随线路长度的变化关系

Fig.9 Variation of induced current with increasing line length on different load

3.2 不同功率因数和塔型对电流值的影响

表 2 数据是线路长度为 10 km，有功负荷为 10 MW 时所得，根据表中数据可作出图 10。结合表 1 可知，鼓型 2 的导线间距最小，其冲击电流和感应电流均最大；伞型 1 的导线间距最大，其冲击电流和感应电流均最小。

另外在不同功率因数下，冲击和感应电流值随无功功率的正向增加而略为减小。

3.3 同杆并架多回线路仿真

在本文第三部分的仿真分析中，主要将同杆并架 3 回及 4 回线路的有关结果和同杆并架双回线路作比较。杆塔模型采用图 2 (b) 所示结构，由于同塔多回线路结构复杂，导线排布组合方式较多，本文只对其中的典型方式进行分析，得出一般性规律。

同塔 3 回结构的上层架设一回线路正常运行，另一回空置；下层假设两回线路，一回正常运行，另一回模拟停运并对合闸过程仿真。

表 2 不同功率因数对 4 种杆塔型式下的合闸冲击电流和稳态感应电流的影响

Tab.2 The impact of different power factors on inrush and induced current of 4 tower types

COSφ	鼓型 1		鼓型 2	
	冲击电流 / A	稳态电流 / A	冲击电流 / A	稳态电流 / A
0.9 (容性)	112.98	3.725	118.93	3.913
0.99 (容性)	112.76	3.721	118.40	3.907
1	112.42	3.716	118.04	3.902
0.99	112.08	3.710	117.68	3.896
0.9	111.74	3.703	117.33	3.888
COSφ	伞型 1		伞型 2	
	冲击电流 / A	稳态电流 / A	冲击电流 / A	稳态电流 / A
0.9 (容性)	102.64	3.373	107.48	3.540
0.99 (容性)	102.05	3.368	107.12	3.535
1	101.74	3.363	106.80	3.530
0.99	101.43	3.358	106.48	3.525
0.9	101.13	3.351	106.15	3.518

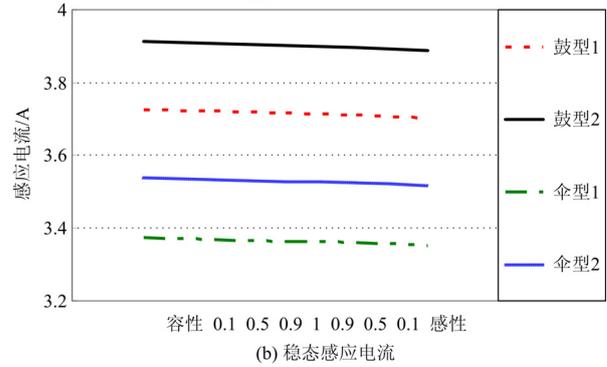
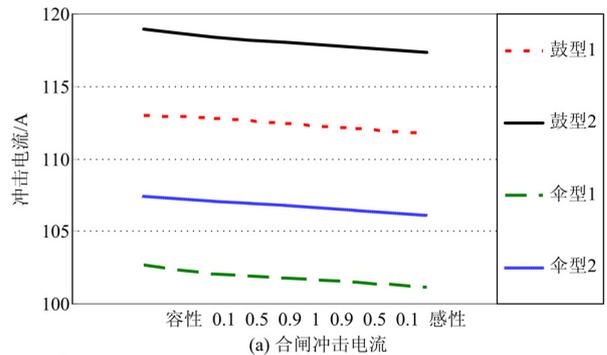


图 10 不同功率因数和塔型对电流值的影响

Fig.10 The impact of power factor and tower type on the inrush current and induced current

同塔 4 回结构的上层两回线路正常运行，下层其中一回停运并对其合闸仿真。

同杆并架多回线路所测数值均为 10 km 线路、正常运行线路负载 10 MW 下得出。如表 3 所示，

同塔 3 回及 4 回线路的合闸冲击电流明显比同塔双回的大。而稳态感应电流方面同塔 3 回路由于上层只有一回运行, 另一回空置, 对下层导线影响不大, 所以电流数值在同塔双回之间; 同塔 4 回路由于停运线路受其他 3 回运行线路共同影响, 所以得出电流数值较大。

另外同塔双回路的有关线路长度、运行负载、功率因数等一般性规律也适用于同塔多回线路。

表 3 同塔多回线路数据比较

Tab.3 Comparison of multi-circuit lines parallel connection on

single tower

塔型	冲击电流/A	感应电流/A
双回鼓型 1	112.42	3.716
鼓型 2	118.04	3.902
伞型 1	101.74	3.363
伞型 2	106.80	3.530
同塔 3 回	137.38	3.447
同塔 4 回	155.46	4.673

4 结论

1) 通过改变运行线路的长度和负载功率, 得出了停运线路合闸过程的电流数据。结果显示: 合闸冲击电流随负载增加的幅度较大, 随线路长度增加的幅度较缓; 而稳态感应电流随线路长度增加的幅度较大, 随功率增加的幅度较小。

2) 根据刀闸开关的安全要求, 当感应电流大于 5 A 时不能进行合闸。结果显示, 同杆并架双回线路当不同负载功率时在长度超过 18~20 km 以后, 其停运线路合闸后的稳态感应电流即大于 5 A, 不能合闸。

3) 杆塔越高、导线间距越大, 其停运线路合闸冲击电流和稳态感应电流则越小; 杆塔越低、导线间距越小, 其停运线路合闸冲击电流和稳态感应电流则越大。

4) 改变运行线路的功率因数, 结果显示: 停运线路的合闸冲击电流和稳态感应电流随无功功率的正方向递增而单调减小, 但减小的幅度很小。

5) 同塔多回线路的仿真结果符合同塔双回线路得出的一般性规律。同塔多回路的冲击电流大于同塔双回路的数值。而同塔 3 回路由于上层导线对停运线路影响不大, 其感应电流没有明显增加; 同塔 4 回路的停运线路受到其他 3 回正常运行线路的共同作用, 其感应电流较大。

在往后的研究当中, 将会加入更加复杂的杆塔和输电线路结构进行研究, 包括更高电压等级同杆

并架线路以及不同电压等级同杆并架线路的研究, 力求更真实详尽地模拟电网实际运行的各种方式, 为工程应用提供更具参考意义的仿真分析。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] 周春生, 李晓明, 李艳丽. 同杆并架双回线故障分析理论与继电器保护应用的讨论[J]. 电网技术(增刊), 2004, 28 (S): 371-374.
- [3] 全玉生. 高压架空输电线路故障测距新算法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- [4] 尤爱秀. 输电线路感应电压分析与计算[J]. 山西电力技术, 2000, 95 (6): 14-16.
YOU Ai-xiu. Analysis and calculation of electromagnetic influence voltage on transmission line[J]. Shanxi Electric Power, 2000, 95 (6): 14-16.
- [5] 赵华, 阮江军, 黄道春. 同杆并架双回输电线路感应电压的计算[J]. 继电器, 2005, 33 (22): 37-41.
ZHAO Hua, RUAN Jiang-jun, HUANG Dao-chun. Calculation of the induction voltage on double circuit transmission lines[J]. Relay, 2005, 33 (22): 37-41.
- [6] 胡毅, 聂定珍. 500 kV 同塔双回线路感应电压的计算及安全作业方式[J]. 中国电力, 2000, 33 (6): 45-47.
HU Yi, NIE Ding-zhen. Calculation of induced voltage and safety working condition on 500 kV double circuit transmission lines[J]. Electric Power, 2000, 33 (6): 45-47.
- [7] 周阳. 500 kV 输电线路平行线附近施工时静电感应电压的计算[J]. 广西教育学院学报, 2002 (3): 65-67.
- [8] 许小龙, 等. 同塔双回输电线路感应电压的计算和分析[J]. 江西电力, 2006, 30 (3): 8-10.
- [9] Dommel H W. 电力系统电磁暂态理论[M]. 北京: 北京水利电力出版社, 1991.
- [10] 周春生. 高压同杆并架双回线故障分析及测距的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [11] 魏旭, 李长益. 500 kV 同杆架设线路感应电流的计算[J]. 华东电力, 2000 (3): 7-11.
WEI Xu, LI Chang-yi. Computation of induction current in 500 kV double circuits[J]. East China Electric Power, 2000 (3): 7-11.
- [12] 胡毅, 聂定珍, 王力农. 500 kV 同塔双回紧凑型线路的带电作业安全距离[J]. 高电压技术, 2003, 29 (8): 3-4.
HU Yi, NIE Ding-zhen, WANG Li-nong. The research of safe distance for live working on 500 kV compact double circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (8): 3-4.
- [13] 郭志红, 姚金霞, 程学启, 等. 500 kV 同塔双回线路感应电压电流计算及实测[J]. 高电压技术, 2006, 32 (5): 11-15.

(下转第 171 页 continued on page 171)

- in weak grids[C]. //Proceedings of IEEE 2005 31st Annual Conference of the Industrial Electronics Society. USA: 2005.
- [12] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化, 2008, 20 (2): 1-8. ZHANG Xing, ZHANG Long-yun, YANG Shu-ying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20 (2): 1-8.
- [13] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的Crowbar对比分析[J]. 可再生能源, 2006 (5): 57-60. LI Jian-lin, ZHAO Dong-li, LI Ya-xi, et al. Analysis of Crowbar circuit for variable speed constant frequency doubly fed induction generator[J]. Renewable Energy, 2006, (5): 57-60.
- [14] Niiranen J. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar[C]. //Proceedings of Nordic Wind Power Conference. Sweden: 2004.
- [15] 姚骏, 廖勇. 基于Crowbar保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (23): 79-83. YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 79-83.
- [16] 张学广, 徐殿国. 电网对称故障下基于active crowbar双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13 (1): 99-103. ZHANG Xue-guang, XU Dian-guo. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13 (1): 99-103.
- [17] 杨涛, 迟永宁, 郑涛. 双馈变速风电机组低电压穿越控制方案的研究[J]. 现代电力, 2009, 26 (4): 36-40. YANG Tao, CHI Yong-ning, ZHENG Tao. LVRT control strategies for DFIG based plants[J]. Modern Electric Power, 2009, 26 (4): 36-40.
- [18] Strachan Nicholas P W, Jovicic Dragon. Dynamic modeling, simulation and analysis of an offshore variable-speed directly-driven permanent-magnet wind energy conversion and storage system (WECSS) [C]. //OCEANS Europe. 2007: 1-6.
- [19] Teodorescu R, Blaabjerg F. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in sand-alone and grid-connected mode[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1323-1332.
- [20] 蒋雪冬, 赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机Crowbar控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32 (12): 84-89. JIANG Xue-dong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dip[J]. Power System Technology, 2008, 32 (12): 84-89.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-12

作者简介:

苏平(1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事变电设备运行与检修工作; E-mail: suping-1214@163.com

张靠社(1965-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统稳定控制和电力市场的研究。

(上接第 163 页 continued from page 163)

- GUO Zhi-hong, YAO Jin-xia, CHENG Xue-qi, et al. Study and measurement of induced voltage and current for 500 kV double-circuit line on same tower[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (5): 11-15.
- [14] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生. 同杆双回线路感应电压和感应电流测量与计算[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 140-143. HAN Yan-hua, HUANG Xiao-min, DU Qin-sheng. Induced voltage and current on double circuits with same tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 140-143.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-29

作者简介:

余涛(1974-), 男, 副教授, 博士, 长期从事电力系统稳定性、非线性鲁棒协调控制等方面的研究工作; E-mail:taoyul@xcut.edu.cn

叶文加(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制; E-mail: delshaet@163.com

梁海华(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制。