

天津电网大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的仿真研究

刘丽霞¹, 岑海凤², 李晓辉¹, 李国栋¹, 王西田², 罗敏², 艾芊²

(1. 天津市电力公司技术中心, 天津 300022; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 随着大容量冲击负荷的不断增长及分布越广泛, 冲击负荷对邻近电厂正常运行所造成的不利影响成为钢铁企业和电力行业共同关注的问题。以天津电网作为研究对象, 采用基于实测数据的冲击负荷模型, 在 EMTP 中仿真分析冲击负荷在不同投入方式下对邻近发电机组的影响。同时, 通过对系统开机方式、系统短路容量及负荷接入点电气距离三个影响因素的计算分析, 探讨了冲击负荷对机组的影响与电网结构的关系, 从而给电网结构规划和机组安全运行提供了指导。

关键词: 天津电网; 冲击负荷; 发电机组; 影响; EMTP

Simulation study of effects of high-capacity impact loads on nearby turbine-generators in Tianjin power system

LIU Li-xia¹, CEN Hai-feng², LI Xiao-hui¹, LI Guo-dong¹, WANG Xi-tian², LUO Min², AI Qian²

(1. Technology Center of Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300022, China;

2. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the large amount and wide distribution of impact loads, adverse effects of impact loads on nearby plants have been issues of common concern. By applying a kind of model for impact loads based on actually measured data, effects of impact loads on nearby turbine-generators in Tianjin power system are firstly simulated in the ElectroMagnetic Transients Program(EMTP). Then, from the aspects of operation conditions of generators, short-circuit capacity(SCC) of PCC and electrical distance of location of impact loads, relationships between effects of impact loads on nearby turbine-generators and the structure of the power system are discussed, thus providing a guide for planning of power system and safe operation of turbine-generators.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807036).

Key words: Tianjin power system; impact loads; turbine-generators; effects; EMTP

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0043-04

0 引言

大型钢铁企业中, 电弧炉、轧钢机等都是典型的大容量非线性负荷, 其日常生产运行具有较大的随机性和冲击性, 不仅对电网供电质量造成不利的影 响, 而且会给邻近电厂的正常运行带来威胁。冲击负荷的投入或退出引起电网有功、无功突变, 一方面导致发电机母线电压和机组频率的波动, 励磁系统和调速系统对此作出反应, 严重的情况下, 冲击负荷的冲击作用可导致机组励磁系统电压/频率保护动作跳开机组^[1]。另一方面, 较大的有功冲击将对周边发电机组轴系造成较为剧烈的暂态扭矩冲击作用, 可能激发一个或几个扭振模态的振荡响应^[2]。到目前为止, 机组轴系扭振影响的研究主要

针对于甩负荷、短路故障、误同期、自动重合闸等机网大扰动下的扭振作用, 对于冲击负荷引起的轴系扭振影响作用是一个亟待深入研究的课题, 更是一次具有实际应用价值的探讨。

冲击负荷对邻近发电机组的影响, 主要体现在负荷突然投入和退出时功率短时间内骤变对机组的冲击作用。本文以天津电网网架结构为基础, 在 EMTP 中对冲击负荷进行建模, 仿真分析冲击负荷在不同的投入方式下对邻近发电机组机端电压、频率及机组轴系安全性的影响。同时, 通过考虑电网结构的改变, 进一步探讨了冲击负荷对发电机组影响的主要因素。

1 研究系统

1.1 网络结构模型

天津电网冲击负荷分布较为集中, 且容量较大。

本文以公共连接点(PCC)MS 处的冲击负荷为研究对象,分析其对邻近电厂发电机组的影响,网络结构如图 1 所示。MS 220 kV 变电站接入的冲击负荷站有 WF1#和 TG1#,包含了电弧炉、精炼炉及轧钢机,它们主要由附近电厂的发电机组送电运行。在基础运行方式下,该电厂开机总数为 5 台,其中电厂 1 期 1 台,3 期 1 台,4 期 2 台,5 期 1 台。电网 220 kV 主网通过 220/500 kV 联变与 500 kV 输电系统相连。

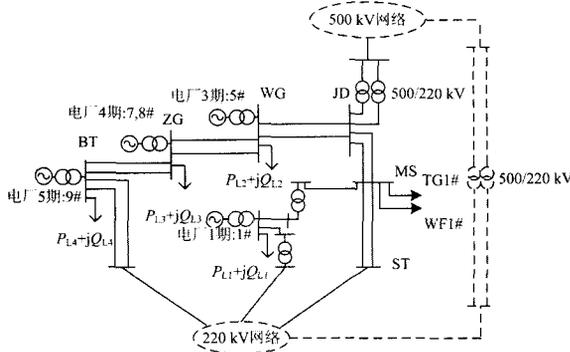


图 1 网络结构简图

Fig.1 Simplified structure diagram of electrical network

1.2 冲击负荷模型

天津电网包含的冲击负荷类型众多,性质不一,主要有交流电弧炉、精炼炉、轧钢机等,对其进行准确的建模是仿真研究冲击负荷对电网及发电机组影响的首要任务。文献[3]以电弧炉电气特性为基础深入地探讨了其建模方法,但所提出的模型未考虑负荷的外特性,即对电力系统的冲击。文献[4]提出了一种基于简化冲击负荷有功功率曲线,与电力系统仿真软件 BPA 相结合的冲击负荷建模方法,但所得模型为经过简化的线性模型,且在 BPA 中只能进行机电暂态仿真。本文仿真分析中,冲击负荷采用 EMTP 中基于实测数据的可控电流源模型,该模型简单实用,适合于各类冲击负荷,与实测数据相比,该模型有较高的准确性和有效性^[5]。图 2 为天津电网 MS 处 WF1#站基于实测数据的冲击负荷可控电流源模型的相电流、有功及无功曲线。

2 冲击负荷对发电机组影响的计算分析

冲击负荷对机组的影响,包括两个方面:其一,冲击负荷引起的无功和有功冲击,会造成发电机组机端电压和频率(转子转速)的波动,发电机组的励磁系统和调速系统会对此作出反应,调整电压和频率以平抑变化;其二,冲击负荷引起的暂态扭矩冲击,对机组轴系扭振的强度安全性会产生不利的

影响。

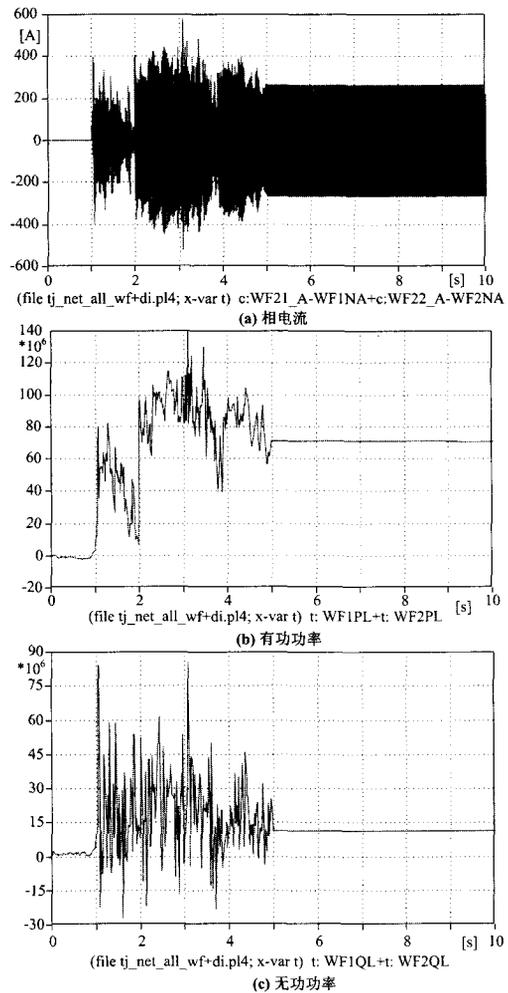


图 2 WF1#的可控电流源模型

Fig.2 The controllable current source model of WF1#

在分析冲击负荷作用时,由于机网相互作用,应把电力系统看成为一个“弹性”联系的整体。在冲击负荷作用瞬间,各机组将首先按离冲击点的电气距离远近恰取冲击功率,因此,近区机组将受到较严重的冲击。随之,各机组按恰取的冲击功率和机组惯性大小开始其电磁暂态过程^[6]。

2.1 单个冲击负荷投入对机组的影响

测试系统采用天津电网 2008 年运行方式下的网络结构,如图 1 所示。考虑公共连接点 MS 处 WF1#站和 TG1#站冲击负荷对邻近电厂机组的影响。本次仿真中 9#机组轴系采用多质量块模型,可考核负荷冲击时该机组轴系截面的暂态力矩变化过程。表 1 汇总了单个负荷冲击时邻近发电机组机端电压波动、频率(转速)偏差、电磁功率偏差及 9#机组轴系危险截面:低压转子 LP—发电机转子 GEN

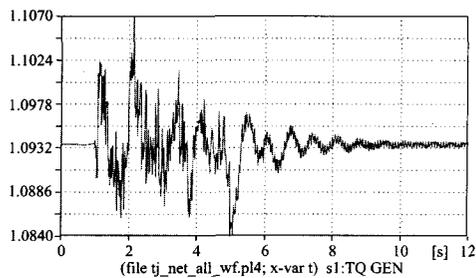
间力矩变化的结果。

由表 1 可看出: 冲击负荷, 尤其是 WF1#, 投入时对邻近机组有一定的冲击作用。在公共连接点 MS 处, 1#机组离冲击点电气距离最近, 且机组容量较小, 所受的冲击也相对严重。对于重点考察的 9#机组, 其轴系暂态力矩波动较小, 扭振作用较弱。同时从图 3 所示的 WF1#作用时 9#机组电磁力矩及轴系力矩响应曲线也可看出, 该机组所受有功冲击较小, 机组轴系仅在额定工况附近小范围内振荡。

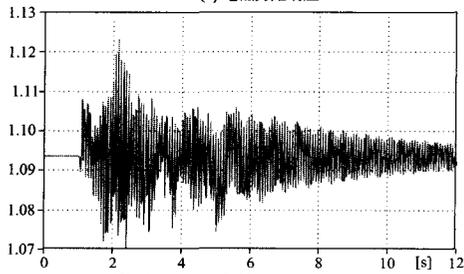
表 1 单个冲击负荷投入对机组影响的计算结果

Tab.1 Calculation results of effects of single impact load

机组	负荷	ΔV_g /(%)	Δf_{max} /Hz	ΔP_e /(10^{-2} pu)	ΔT_{LP-GEN} /(%)
电厂 1#	TG 1#	0.066 7	0.001 3	0.20	/
	WF 1#	0.371 4	0.011 7	2.06	
电厂 5#	TG 1#	0.063 5	0.001 2	0.13	
	WF 1#	0.330 2	0.012 3	1.55	
电厂 7#	TG 1#	0.044 4	0.001 1	0.12	
	WF 1#	0.254 0	0.011 2	1.41	
电厂 9#	TG 1#	0.040 0	0.001 1	0.15	0.310 9
	WF 1#	0.245 0	0.011 2	1.74	2.487 2



(a) 电磁力矩响应



(b) LP-GEN力矩响应

图 3 WF1#投入时 9#机组电磁力矩和 LP-GEN 力矩响应

Fig.3 EM torque and shaft torque response to the startup of WF1#

2.2 多个冲击负荷同时投入对机组的影响

由于电弧炉、精炼炉等冲击负荷的运行存在着很大的随机性, 当电网冲击负荷分布较为集中时, 分析负荷在同时冲击的严重情况下对邻近发电机的影响是有必要的。在此考虑 WF1#、TG1#同时投入以及所有冲击负荷同时投入时, MS 变电站邻近电厂发电机组的电磁暂态过程, 表 2 记录了其计算结果。

对比表 1 可看出, 冲击负荷同时投入时发电机组所受影响增大, 但是其影响并非随冲击负荷的大小呈线性增加, 较单个投入时的线性叠加要小, 这主要与负荷和电网相互作用引起系统潮流重新分配有关。

表 2 多个冲击负荷同时投入对机组影响的计算结果

Tab.2 Calculation results of effects of multiple impact loads

机组	负荷	ΔV_g /(%)	Δf_{max} /Hz	ΔP_e /(10^{-2} pu)	ΔT_{LP-GEN} /(%)
电厂 1#	TG 1#+ WF 1#	0.381 0	0.011 8	2.06	/
	ALL	0.638 1	0.049 2	4.92	
电厂 5#	TG 1#+ WF 1#	0.336 5	0.013 1	1.56	
	ALL	0.603 2	0.047 9	3.50	
电厂 7#	TG1#+ WF1#	0.279 4	0.011 9	1.42	
	ALL	0.546 0	0.040 2	3.37	
电厂 9#	TG 1#+ WF 1#	0.255 0	0.011 9	1.75	2.560 4
	ALL	0.510 0	0.037 9	4.61	6.181 4

3 冲击负荷对发电机组影响的主要因素

3.1 系统开机方式的影响

电网在全年运行中, 根据网络用电负荷的波动, 或电厂机组检修时, 需对电厂开机方式作适时的调整。不同的开机方式会引起负荷冲击瞬间分配到各机组的冲击功率发生变化, 从而导致各机组所受的影响也随之变化。在图 1 所示的网络结构中, 增开两台机组, 分别为电厂 3 期 6#机组以及电厂 5 期 10#机组, 仿真分析 WF1#、TG1#同时冲击时机组所受的影响, 计算结果在表 3 中汇总列出。

对比表 2、表 3 可看出: 冲击负荷邻近电厂的发电机组开机台数增加时, 在一定程度上可减小各机组在负荷作用瞬间承担的冲击功率, 从而减小机组所受的影响。

表3 系统开机方式变化时机组所受影响的计算结果
Tab.3 Calculation results of effects on nearby generators under different operation conditions of generators

机组	ΔV_g /(%)	Δf_{max} /Hz	ΔP_e /(10^{-2} pu)	ΔT_{LP-GEN} /(%)
电厂 1#	0.342 9	0.012 7	1.81	/
电厂 5#	0.285 7	0.009 4	1.45	
电厂 7#	0.234 9	0.008 1	1.34	
电厂 9#	0.215 0	0.011 5	1.60	

3.2 系统短路容量的影响

图 1 所示的网络结构中, 公共连接点(PCC)MS 与 ST 相连于 220 kV 主网, 同时 MS 通过 220 kV 线路及 220/500 kV 联变与 500 kV 输电网络相连。当 MS 变电站附近出现线路或 220/500 kV 联变退出检修时, 其短路容量发生变化, 此时冲击负荷对发电机组的影响也将相应改变。本文以 WF1#、TG1# 同时投入时为例, 仿真分析 MS-ST 双回线断开时冲击负荷对发电机的影响, 计算结果如表 4 所示。

表 4 PCC 短路容量变化时机组所受影响的计算结果
Tab.4 Calculation results of effects on nearby generators under different short-circuit capacities of PCC

机组	ΔV_g /(%)	Δf_{max} /Hz	ΔP_e /(10^{-2} pu)	ΔT_{LP-GEN} /(%)
电厂 1#	0.457 1	0.011 7	2.56	/
电厂 5#	0.400 0	0.014 6	1.89	
电厂 7#	0.311 1	0.013 0	1.61	
电厂 9#	0.295 0	0.012 0	1.90	

对比表 2、表 4 可看出, MS-ST 双回线断开, 公共连接点(PCC)MS 短路容量减小时, 冲击负荷对发电机机组的影响有所增大。

3.3 冲击负荷接入点的影响

电网规划中, 冲击负荷接入点是一个涉及因素甚多、影响较为复杂的综合性问题。电网运行方面, 合理的接入点既要保证冲击负荷对电网供电质量的影响在一定范围内, 又要考虑到负荷作用时邻近电厂发电机组的安全稳定运行。本文基于图 1 所示网络结构, 仿真分析即将送电的冲击负荷 WF2# 分别接入 JD, MS 时, 与 WF1#、TG1# 同时投入的情况下对机组的冲击作用。计算结果如表 5 所示。

由于发电机组具有无功调节能力, 负荷冲击时, 机组可迅速调节其无功出力, 维持系统无功平

衡。因此, 冲击负荷接入电厂附近有利于电网供电质量的改善, 但与此同时, 电厂离冲击负荷电气距离越近, 该电厂发电机组在负荷作用瞬间所承担的冲击功率就越多, 从而所受的轴系安全性威胁也就越大。根据表 5 记录的冲击负荷在不同接入点时机组所受影响的计算结果即可看出这一点。

表 5 冲击负荷接入点变化时机组所受影响的计算结果
Tab.5 Calculation results of effects on nearby generators under different locations of impact loads

机组	接入点	ΔV_g /(%)	Δf_{max} /Hz	ΔP_e /(10^{-2} pu)	ΔT_{LP-GEN} /(%)	
军厂 1#	JD	0.438 1	0.018 3	2.51	/	
	MS	0.476 2	0.018 3	2.66		
军厂 5#	JD	0.463 5	0.015 6	2.28		
	MS	0.438 1	0.015 2	2.16		
军厂 7#	JD	0.387 3	0.014 3	1.94		
	MS	0.368 3	0.014 0	1.91		
军厂 9#	JD	0.365 0	0.013 6	2.45		4.206 3
	MS	0.355 0	0.013 5	2.41		4.188 0

4 结论

1) 冲击负荷对邻近发电机组的正常运行会造成不利影响。虽然负荷作用时引起的机组机端电压、频率波动及轴系扭应力矩较小, 但由于冲击负荷的生产运行是常态性的运行操作, 在长期的积累下, 对机组的安全性影响仍不可忽视, 尤其是在机组轴系有局部应力集中的情况下。

2) 同一负荷冲击时, 机组容量越小, 且距离冲击点越近, 所受影响就越严重。在多个负荷同时冲击的情况下, 机组所受影响并非随冲击负荷的大小线性增加, 要比负荷单个投入时线性叠加要小。

3) 系统开机方式、公共连接点(PCC)短路容量或冲击负荷接入点不同时, 冲击负荷对发电机组的影响也有所不同。这在电网规划和运行时应予以重视, 在保证冲击负荷运行过程中电网供电质量的同时, 还应充分考虑邻近电厂发电机组的安全运行。

参考文献

[1] Wu Chi-jui, Yen Shih-shong, Chang Wei-nan, et al. Enhancement of Static Excitation System Performance for Generators near Electric Arc Furnace Loads[J].IEEE Trans on Energy Conversion,1999, 14(2): 225-231.

(下转第 52 页 continued on page 52)

- [7] 葛少云,李建芳,张宝贵.基于二分法的配电网分段开关优化配置[J].电网技术,2007,31(13):44-49.
GE Shao-yun,LI Jian-fang,ZHANG Bao-gui.Optimal Configuration of Sectional Switches in Distribution Network Based on Bisection Method[J]. Power System Technology,2007,31(13):44-49.
- [8] 万国成,任震,荆勇,等.主馈线分段开关的设置研究[J].中国电机工程学报,2003,23(4):124-127.
WAN Guo-cheng,REN Zhen,JING Yong,et al. Deployment of Disconnect Switches on Main Feeder[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):124-127.
- [9] Wang P, Billinton R. Demand-side Optimal Selection of Switching Devices in Radial Distribution System Planning[J]. IEEE Proceedings Online,1998,145(4):409-414.
- [10] 龙晓慧,乐秀镭,等.用于配电网开关优化配置问题的二进制PSO算法[J].电力学报,2007,22(3):319-322.
LONG Xia-hui,LEI Xiu-fang,et al. Application of Binary PSO Algorithm to Switch Installing Optimization in Distributing Network[J]. Journal of Electric Power,2007,22(3):319-322.
- [11] Roy Billinton ,Satish Jonnavithula .A Test System For Teaching Overall Power System Reliability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(4):1070-107.
- [12] 刘柏私,谢开贵,等.复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J].中国电机工程学报,2005,25(4):40-45.
LIU Bo-si,XIE Kai-gui,et al. Section Algorithm of Reliability Evaluation for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(4):40-45.
- [13] 万国成,任震,吴日升,等.混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(9):92-98.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, WU Ri-sheng, et al. Hybrid Method for the Reliability Evaluation of the Complex Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):92-98.
- [14] 陆志峰,周家启,阳少华,等.多元件备用系统可靠性计算研究[J].中国电机工程学报,2002,22(6):52-55.
LU Zhi-feng, ZHOU Jia-qi, YANG Shao-hua, et al. Study on Reliability Computation For System With Multi-Component in Reserve[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(6):52-55.
- [15] 王天华,王平洋,范明天.馈线自动化规划中环网开关配置的优化算法[J].电力系统自动化,1999,23(15):15-17.
WANG Tian-hua,WANG Ping-yang,FAN Ming-tian. An Optimization Method Of Allocation of Sectionalizing Switch in Looped Networks for Feeder Automation Planning[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(15):15-17.

收稿日期:2008-10-29; 修回日期:2008-11-21

作者简介:

许丹(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网可靠性与开关优化配置以及GIS在配电网中的运用;E-mail:S07111259@cau.edu.cn

唐巍(1971-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为配电自动化,电网性能分析,人工智能在电力系统的应用等。

(上接第46页 continued from page 46)

- [2] Ta-Peng,Jong-Ian Tsai.Torsional Interactions between an Electric Arc Furnace Load and a Turbine-Generator Set[A]. in:Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies(DRPT2004)[C].Hongkong (China) : 2004.627-632.
- [3] Zheng Tong-xin, Makram E B, Girgis A A.Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion[A]. in:Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98)[C].Athens (Greece): 1998.1079-1085.
- [4] 高超,程浩忠,李宏仲,等.大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性的影响[J].电网技术,2008,32(1):31-35.
GAO Chao,CHENG Hao-zhong,LI Hong-zhong, et al. Influence of High-Capacity Impact Loads on Transient Stability of Regional Power System[J].Power System Technology,2008,32(1):31-35.
- [5] 顾丹珍,艾芊,陈陈,等.冲击负荷实用建模新方法[J].电力系统自动化,2006,30(20):10-14.
GU Dan-zhen,AI Qian, CHEN Chen, et al.A General Modeling Method for Impact Load[J].Automation of Electric Power Systems,2006,30(20):10-14.
- [6] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会.电压电流频率和电能质量国家标准应用手册[M].北京:中国电力出版社,2001.

收稿日期:2009-02-20; 修回日期:2009-03-18

作者简介:

刘丽霞(1981-),女,硕士,研究方向为电力系统规划和电力系统稳定分析;

岑海凤(1985-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统次同步谐振和轴系扭振。E-mail: cenhaifeng@hotmail.com