

灾害空间天气对我国电网安全的影响及风险

刘连光

(华北电力大学电气工程学院,北京 102206)

[摘要] 通过对第23太阳周几次磁暴期间广东岭澳500 kV电网的地磁感应电流(GIC)实测数据,2010年西北陕、甘、青、宁750 kV电网GIC的计算结果,以及500~1 000 kV电网结构特点和1859年超级磁暴强度的分析,阐述了极端空间天气对我国未来特高压、大规模电网安全的可能影响,提出了应对极端空间天气的研究建议。

[关键词] 空间天气;磁暴;GIC;特高压;电网安全

[中图分类号] TM72 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)09-0029-05

1 前言

2009年3月,美国国家科学院发布特别报告予以警告^[1],新的太阳活动峰年即将到来,强烈太阳风暴将对地球及人类造成很大影响,其破坏力将远远超过“卡特里娜”飓风,并将中国列为被警告的国家之一。特别报告顾问、电力专家约翰-卡平曼表示:“这种灾难与我们通常想像的灾难完全相反,通常是欠发达地区容易受到攻击,在这种灾难中,越发达的地区越容易受到攻击”。由于现代社会对电力的过分依赖,发生大面积的停电事故,无疑会造成人们生产、生活秩序的严重混乱,带来巨额经济损失和严重社会影响,因此科学界和公众对美国科学家的警告都十分关注。

在加拿大魁北克大停电^[2]后20年中,人们采取了一些措施以减缓电网GIC的影响。但2003年10月,强磁暴仍导致瑞典马尔默停电和烧毁南非15台400 kV大型变压器事件^[3,4]的发生。2003年前后几年,我国江苏^[5]、浙江^[6]、广东^[7]等地的电网都有遭受侵袭的报道,虽然没有引发严重的大停电,但已

经对电网主要设备(变压器)的正常运行造成一定影响,导致了一些事件的发生^[8]。如有更大的超级磁暴发生时,还会造成更大的破坏,笔者通过对电网GIC实测、计算数据和电网结构等问题的分析,阐述了极端空间天气对我国未来电网安全可能的影响。

2 500 kV 电网影响实测

在第23太阳周峰年,获得了7次磁暴时广东岭澳核电站(22.6°N,114.6°E)变压器的GIC实测数据^[7]。其中,岭澳核电站1#变压器中性点实测GIC的峰值如表1所示。表中磁暴相关的数据来自中国地震局地球物理研究所的《磁暴报告》,GIC峰值是监测装置秒数据的统计结果。其中,2004年11月7日和11月9日磁暴引发的GIC最大,峰值分别为47.2 A和75.5 A。直观现象是导致了变压器的强烈振动和严重噪声,开始由于人们不了解振动、噪声产生原因,误认为是广东电网直流输电调试所造成的影响,引发了广东核电集团与广东电网集团间的纠纷。

[收稿日期] 2009-09-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50477039和50677020);国家“八六三”计划项目(2007AA04Z425)

[作者简介] 刘连光(1954-),男,吉林汪清县人,华北电力大学教授,博士生导师,主要从事电力系统安全运行与灾害防治方面的研究工作;
E-mail: llguang@cj.net.cn

表 1 2004 — 2005 年几次磁暴发生时广东岭澳核电站变压器中性点的 GIC(实测值)

Table 1 Measured GIC of transformer neutrals in Ling'ao nuclear power plant during magnetic storms in 2004 — 2005

Kp 指数	磁暴类型	起止时间(UT)	GIC 峰值/A
8	急始	2004 - 11 - 07 10:30 至 2004 - 11 - 08 12:30	47.2
8	急始	2004 - 11 - 09 18:30 至 2004 - 11 - 10 22:30	75.5
8	急始	2005 - 01 - 21 17:00 至 2005 - 01 - 23 00:30	17.9
9	急始	2005 - 05 - 15 02:30 至 2005 - 05 - 16 19:30	27.9
7	缓始	2005 - 05 - 29 20:30 至 2005 - 05 - 31 00:30	5.6
9	急始	2005 - 08 - 24 06:00 至 2005 - 08 - 25 21:30	19.1
7	缓始	2005 - 08 - 31 06:30 至 2005 - 09 - 01 18:30	5.7

对岭澳核电站 GIC 数据和广东肇庆地磁台地磁分量数据,及 2006 年 11 月江苏上河变电站 GIC 数据进行研究表明,电网 GIC 的大小决定地磁场水平分量的变化率、电网结构和输电线路的大地电性构造,地理纬度的影响不明显。广东岭澳核电站纬度(22.6°N,114.6°E)比江苏上河变电站低(33.4°N,119.2°E),但 2006 年 11 月岭澳核电站 GIC(峰值 16.6 A)比上河变电站(峰值 13 A)大,可能与岭澳核电站存在海岸效应和上河变电站上游安装串补装置有关。

除广东电网和江苏电网外,我国浙江、广西等地电网也都有受侵袭报道。尤其是第 23 太阳周高峰期的几年,对发生的变压器振动、噪声现象有很多记载^[5,6]。由于 GIC 是随着电网规模增大出现的新问题,人们普遍对空间天气问题了解很少,因此很多地方使问题复杂化并造成了一定的损失。例如,怀疑变压器振动、噪声是质量问题向制造厂商索赔,花费数月、大量人力来查找原因;对变压器停电进行吊芯检修等。不仅耗费了大量的人力、物力,停电检修的损失也很大。

3 750 kV 电网影响计算

为了评估西北 750 kV 规划电网的 GIC 水平,课题组提出了基于磁暴地磁数据和大地电性参数计算地面感应电场(ESP)及电网 GIC 的算法^[9],建立了 2010 年西北陕甘青宁 750 kV 电网(电网图略,其规模与发生过大停电的魁北克电网相当)GIC 计算模型和大地电阻率模型,完成了该电网 46 段输电线路 ESP 和 21 座变电站变压器 GIC 的计算。

2004 年 11 月磁暴时广东岭澳核电站变压器的 GIC 最大。对该磁暴分析表明,11 月 9 日 22:00 至 23:59(UT)时段的地磁变化最为剧烈。因此,在西北电网 GIC 的计算中,地磁数据采用嘉峪关、格尔木、乌鲁木齐、喀什 4 个台站 11 月 9 日 22:00 至

23:59(UT)时段的数据,得到的 21 座变电站变压器中性点的 GIC 计算结果如表 2 所示。各变电站变压器的 GIC 为所接线路 GIC 的代数和,对电网安全的影响取决于变压器 GIC 的大小,对 46 段输电线路的 GIC 文中没有列出。

表 2 2010 年西北 750 kV 变电站变压器中性点的 GIC(计算值)

Table 2 Calculated GIC in transformer neutrals of each substations in 2010 Northwest China 750 kV planning power grid

变电站名称	GIC 峰值/A	变电站名称	GIC 峰值/A
哈密	50.154	贺兰山	53.457
安西	18.240	拉西瓦水电站	37.476
酒泉	46.917	官亭	31.101
金昌	71.535	兰州东	6.767
永登	93.495	乾县	53.985
格尔木	12.630	天水	80.724
西宁二	1.753	宝鸡	47.967
西宁一	32.511	渭南	101.538
白银	51.618	延安	49.908
黄河	41.484	榆横	88.311
银川东	49.446	—	—

从表 2 可以看出,与 500 kV 的岭澳核电站相比,750 kV 电网 GIC 数值大很多。其中,渭南变电站的 GIC 最大,其值为 101.538 A。750 kV 电网 GIC 大的原因在于:500 kV 线路最多为四分裂导线(每相 4 根导线),而 750 kV 电网输电线路最少是六分裂导线,其单位电阻最大是 500 kV 线路的 2/3,因此在相同磁暴、电网结构和地质构造条件下,750 kV 电网 GIC 应该是 500 kV 电网的 3/2 倍。目前,渭南站(101.538 A)小于岭澳站(75.5 A)的 3/2 倍,与两个电网的结构、大地电性构造不同有关。

对 GIC 数值较大的变电站,收集了变压器厂家的铁芯结构、尺寸等参数和数据,建立了基于 JA 理论^[10]的变压器铁芯饱和模型,给出了 GIC 对变压器影响的评估结果。结果表明,变压器铁芯严重偏磁

饱和,励磁电流除3,5,7等奇次谐波外,还含有很大的2,4,6等偶次谐波;另外,高次谐波经自耦变可直接进入低压系统,将对低压系统SVC等装置继电保护的正常动作产生一定的影响(影响情况与保护装置的原理有关)。

由于750 kV电网GIC大,变压器为单相变压器组、自耦变结构,因此陕甘青宁750 kV电网建成后,如果发生2004年11月同样的磁暴,750 kV电网受到的影响比500 kV电网更大。

4 未来电网影响评估

前述分析、研究都是针对现状电网和2004年11月磁暴进行的。如果遭遇完全可能发生、类似1859年的超级磁暴(卡林顿事件),我国2012年电网的GIC是什么水平?受影响是什么程度?由于缺少卡林顿事件数据和2012年电网、大地电性构造等相关参数,目前还无法给出准确的计算结果。通过查阅资料,对2004年11月磁暴和1859年超级磁

暴可能产生的影响评估如下。

我国的能源分布和经济发展极不均衡,中西部的能源资源需要在全国范围优化配置,我国提出了建设1 000 kV特高压电网的发展规划,通过大容量、远距离输电实现全国能源资源的优化配置,特高压电网初步规划如图1所示。从图中可看出,规划的特高压电网主网架呈明显的东西走向,磁暴发生时容易引发较大的GIC。

与500 kV电网相比,1 000 kV特高压电网最少为八分裂导线,导线的单位电阻最多是500 kV电网的1/2,按照2004年11月广东岭澳GIC推算,特高压变电站变压器的GIC可达150 A以上,考虑“拐点效应”等因素,个别变电站达到200 A是完全可能的;与西北750 kV电网一样,特高压变压器为三相变压器组、自耦变结构,变压器铁芯更容易饱和,电网GIC会通过自耦变直接进入低电压系统。因此,特高压电网耐受GIC能力比750 kV电网还要差。

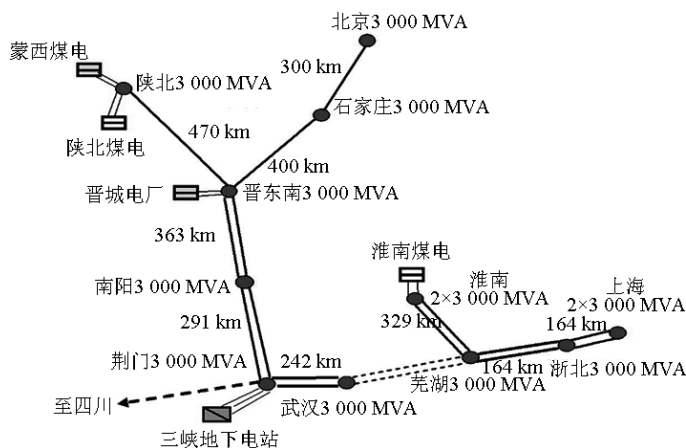


图1 2010年特高压电网规划

Fig. 1 UHV power grid planning in 2010

由于缺少1859年8月28日超级磁暴的地磁数据,无法准确计算该磁暴可能引发的GIC,但该次磁暴的Dst指数极小值为-1 760 nT,为2004年11月10日磁暴Dst指数极小值-282 nT的6.24倍。据此可推算,如果遭遇1859年8月磁暴的侵袭,特高压电网GIC可达数百或上千安。目前数十安的GIC已对变压器造成严重影响,未来电网遭遇超级磁暴有可能会是灾难性的。

5 极端空间天气的风险

GIC频率为0.000 1 ~ 0.01 Hz^[7],导致的直接

影响是变压器铁芯因直流偏磁半波饱和,变压器铁芯饱和的直观现象是变压器振动、噪声增大和温度升高,更严重危害在于铁芯饱和产生高次谐波、无功波动造成继电保护装置误动作。无论是输电线路、还是变压器保护误动,都可能引起电网保护的连锁反应,从而引发大面积的停电事故,造成巨额经济损失和严重社会影响。

1989年3月磁暴引发的加拿大魁北克大停电,使600多万人9 h无电可用,仅魁北克水电局的直接经济损失为数千万美元,魁北克地区的GDP损失比这个数字要大出很多倍^[11]。在事故发生后的几

年中,魁北克水电局投入的电网 GIC 防治改造费用高达 8.34 亿加元。D. H. Boteler 估计,如果事故发生在当时的美国东部,会造成高达数十亿美元的直接经济损失^[11]。

大停电社会影响巨大。20 世纪 60 年代的美国东部大停电,因电力的短缺导致社会犯罪率猛增^[11]。2003 年 8 月 14 日美加东部大停电使 5 000 多万人小时无电可用,直接经济损失为 300 亿美元,间接损失和社会影响无法估量。2008 年年初,我国南方冰雪灾害导致的停电,直接经济损失为 400 多亿元。这些事故起因不是灾害空间天气,但这些事故说明,现代社会对电力的过分依赖和现代电网的脆弱性、高风险性,大面积停电造成的经济损失和社会影响是巨大的。

如前文所述,按 2004 年 11 月磁暴岭澳电网的 GIC 推算,1 000 kV 特高压变电站的 GIC 可达 150 A 以上;如果遭遇 1859 年超级磁暴,特高压电网 GIC 可能达数百或上千安。有可能美国特别报告警告的超级磁暴不会伤害到我国的电网,但对《磁暴报告》数据的统计表明^[12],在 2001 年 1 月至 2005 年 12 月的 5 年中,共发生过中强以上磁暴(K 指数 6 以上)75 次,其中强磁暴(K=8,9)22 次,2004 年 11 月磁暴并不是期间的最强磁暴。另外,Boteler D H 等人的仿真计算表明,引发魁北克大停电的 GIC 水平不到 200 A^[13]。因此,我国未来超大规模电网强磁暴下的灾害风险不低于北欧、北美国家。

6 结语

不仅是电网,灾害空间天气对输油气管线和卫星、通信等技术系统都有很大的影响。随着人类地基、地基科技活动增多,灾害空间天气的研究已成为当代国际的科技活动热点^[14,15]。而目前国内的研究工作主要局限在科学界的基础理论研究上,在工程技术领域存在的观念是“还没听说过”、“还没有发生事故”,认识上的差距是制约工程技术领域创新发展的问题之一。

人类的很多创新科技活动会遭遇新挑战,随着我国经济发展、电网结构变化和电网规模增大,灾害空间天气影响我国电网安全、导致电网停电事故的风险很大,尤其是特高压、大规模电网发生事故的经济损失和社会影响不可估量,建议国家相关部门、相关机构对美国科学院科学家的警告和极端空间天气

对我国电网安全的影响及风险给予高度关注,做出必要的应对决策。

灾害空间天气影响及防治问题涉及学科、领域广泛,包括空间物理、地球物理等基础学科和电力、通信、卫星等工程技术领域。目前,工程技术领域对灾害空间天气的关注不够,科学界的基础理论成果仍有待向应用转化。

参考文献

- [1] National Research Council of the National Academies. Severe space weather events—Understanding societal and economic impacts[J]. National Academies Press, 2009, 3
- [2] Kappenman J G, Albertson V D. Bracing for the geomagnetic storms[J]. IEEE Spectrum, 1990, 27(3): 27 - 33
- [3] Wik M A, Viljanen R, Pirjola, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden[J]. Space Weather, 2008, 6(7): 11
- [4] Gaun C T, Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC risk[J]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 2007, 807 - 812
- [5] 刘林玉, 谢学武. 500kV 主变压器异常声音分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 85 - 87
- [6] 张建平, 潘星. 500kV 变压器异常噪声与振动的原因分析[J]. 浙江电力, 2006, 3: 6 - 10
- [7] 刘连光, 刘春明, 张冰, 等. 我国广东电网几次强磁暴影响事件[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 976 - 981
- [8] 盘学南, 玉小玲. 变压器运行噪声异常的探讨[J]. 变压器, 2006, 43(8): 43 - 44
- [9] Liu Chunming, Liu Lianguang, Risto Pirjola, et al. Calculation of GIC in mid - low - latitude power grids based on the plane wave method: a preliminary case study[J]. Space Weather, S04005, doi:10.1029/2008 SW000439, 2009, 9 pp
- [10] Liorzou F, Phelps B, Atherton D D. Macroscopic models of magnetization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, (36): 418 - 428
- [11] Boteler D H. Geomagnetic hazards to conducting networks[J]. Natural Hazards, 2003, 28: 537 - 561
- [12] 中国地震局地球物理研究所. 磁暴报告[J]. 2001, 23(1) - 2005, 27(4)
- [13] Boteler D H, Bui - Van Q, Lemary J. Directional sensitivity to geomagnetically induced currents of the Hydro - Quebec 735 power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1963 - 1969
- [14] 魏奉思. 空间天气学[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(增刊): 1 - 7
- [15] 魏奉思. 空间天气学的基本问题[J]. 中国基础科学. 科学前沿, 2000, (7): 9 - 13

Influence and hazard of disastrous space weather on power grid in China

liu Lianguang

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China)

[**Abstract**] The measured data of GIC in Guangdong Lingao 500 kV power networks during the several magnetic storms at the peak of 23rd Solar Cycle, the GIC calculation results of 2010 750 kV planning power grid in Shanxi, Gansu, Qinghai and Ningxia, the structure and characteristics of power networks from 500 kV to 1 000 kV, and super magnetic storm in 1859 are analyzed in this paper. Through the analysis, the possible impacts of extreme space weather on the future UHV, large - scale power system security in China are discussed, and the research suggestions coping with the strong solar storms are proposed.

[**Key words**] space weather; magnetic storm; GIC; UHV; power grid safety

(上接 20 页)

Research progress of aluminium alloy automotive sheet and application technology

Ma Mingtu¹, You Jianghai², Lu Hongzhou¹, Wang Zhiwen³

(1. China Automotive Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. Southwest Aluminium Industry Group Ltd, Chongqing 401326, China; 3. SAE China Beijing, Beijing 100055, China)

[**Abstract**] Pre - treatment technology was deeply discussed to explain its importance in guaranteeing properties and formability of aluminium alloy automotive sheet. Some typical application of aluminium alloy automotive sheet to automotive industry was listed. Based on the author's knowledge and recognition of this paper and research progress present, the stress research contents about aluminium alloy automotive sheet were emphasized. Reducing cost and price of sheet and deeply developing application research are important work for the expanding the application of aluminium alloy automotive sheet to the automobile.

[**Key words**] automobile lightweighting; aluminium alloy; mechanical property; formability; pre - treatment technology; stress research content