

大型电网连锁故障分析技术及大停电智能预警系统

刘挺坚,刘俊勇,刘友波

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:连锁故障引发的大停电事故在全球范围内时有发生,对社会和经济造成了巨大损失。为了理解连锁故障的演变特征并进一步构建有效的大停电预防系统,回顾近年来国内外发生的 8 次大停电事故,研究大停电事故的故障演化过程;对现有连锁故障研究模型和方法进行评述,分析其适用性及模型优缺点;提出基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法;最终基于所提连锁故障时序事件搜索方法构建了可用于大停电风险可视化预警的智能预警系统。

关键词:连锁故障;演变特征;时序事件;大停电预防;可视化预警

Abstract: Great blackouts induced by cascading failures occurred frequently in recent years, resulting in great loss in society and economy. In order to understand the evolution feature of cascading failures and further establish an effective blackout prevention system, the evolution procedure of great blackouts is firstly studied by reviewing eight great blackouts occurred in the worldwide, and then the methodologies for cascading failures analysis are reviewed. After that, an analysis method based on event checkers and continuous time domain simulation is proposed. Consequently, the application system for great blackout mitigation is established.

Key words: cascading failures; evolution feature; time-series events; blackout prevention; alert visualization

中图分类号:TM711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)02-0001-05

电网的大规模互联提高了能源经济效益和供电可靠性,然而近年来大停电事故时有发生:2003 年北美^[1-2]、伦敦^[3]、意大利^[4]先后发生大停电事故;2006 年中国华中电网^[5]和欧洲电网^[6]先后发生大停电事故;巴西电网在 2009 年^[7]和 2011 年^[8]分别发生两次大停电事故;印度电网在 2012 年 7 月 30 日和 31 日发生两起大停电事故^[9]。随着现代微机保护装置和励磁控制器的应用,单一故障一般难以造成系统崩溃,而具有时序特性和传播特性的连锁故障却成为引发大停电的主要故障形式。尽管连锁故障属于极小概率事件,然而大停电事故所带来的巨大经济损失使得连锁故障受到系统运行人员和科研人员的广泛关注。

为了更好地理解连锁故障的演化过程并进一步建立有效的大停电预警系统,首先回顾近年来国内外发生的连锁故障实例,阐述连锁故障演化过程并分析各次大停电事故的系统演变特征;对现有连锁故障研究方法进行评述,在此基础上提出基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法;最终基于所提连锁故障时序事件搜索方法构建了可用于大停电风险评估的可视化智能预警系统。

基金项目:四川省科技厅产业发展重大关键技术项目(2011GZ0225)

1 连锁故障演变机理及相关研究方法评述

1.1 连锁故障演变机理

连锁故障往往起源于系统运行资源紧张(如重负荷、重要发/输电设备停运)情况下的某一个或一系列源发性故障(initial events),即 $N-k$,进而引发具有时序特征的相继事件(consequential events),形式上形成 $N-k-1-1\cdots-1$,这些事件在因果上一般具有较强关联关系,是一个伴随着低压、过载、保护频繁动作、解列、失稳、频率波动等系统响应的复杂交叠过程^[10]。

连锁故障演化过程如图 1 所示。初始阶段,输电线路短路或意外跳闸、发电机组意外脱网、直流闭锁等源发性故障发生,系统偏离计划运行状态。故障阶段,时序事件相继发生,系统状态持续恶化。故障阶段一般存在快慢交替的故障过程和时序事件,其中慢过程事件主要是潮流转移引发的保护Ⅲ段开断过载线路或隐性故障引发的重载输电设备误切,快过程事件包括重要输电通道发生功率振荡引发系

统解列、发电机保护动作切除机组、低压/低频切负荷、电动机低压堵转等。随着相继大规模切机切负荷,系统发生大停电事故,时序事件结束。

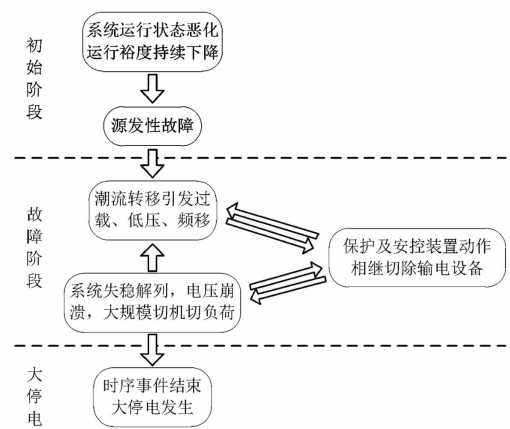


图 1 连锁故障演化过程

文献[11]基于连锁故障演变过程的关键事件将故障演变形态归纳为元件过载主导型、电网结构主导型和保护配合主导型:1)元件过载主导型的典型特征为故障前期潮流转移导致线路缓慢地相继被切,中后期临界事件引发极快的、难以逆转的电压崩溃和无序切机切负荷,2003 年北美和 2003 年意大利属于元件过载主导型连锁故障;2)电网结构主导型的典型特征为联络线功率振荡使得自动解列装置迅速把电网解列为若干子系统,各子系统内功率严重不平衡导致大规模切机切负荷,2006 年欧洲、2009 年巴西和 2012 年印度属于电网结构主导型连锁故障;3)保护配合主导型的典型特征为二次设备隐性故障导致源发故障扩大化从而促进潮流转移和故障传播,2003 年伦敦、2006 年华中和 2011 年巴西属于保护配合主导型连锁故障。

1.2 现有连锁故障研究方法评述

OPA 模型^[12-13]、CASCADE 模型^[14]、隐性故障模型^[15]、Manchester 模型^[16]、脆弱元件模型^[17]、复杂网络模型^[18]、概率风险模型^[19]等模型先后被提出并用于研究连锁故障的演化机理:

1)OPA 模型考虑连锁故障引发停电事故的快动态过程和系统扩容的慢动态过程,能够研究系统的长期停电风险和自组织临界特性,然而在模型精度和计算耗时上需要折中;

2)CASCADE 模型考虑线路开断后潮流转移引发新一轮线路过载开断的过程,然而其抽象概率模型难以反映电力系统的物理特性;

3)隐性故障模型建立考虑线路运行状态的保护装置动作概率模型,从而模拟保护系统在故障传播过程中推波助澜的作用;

4)Manchester 模型基于切负荷控制的交流潮流

算法研究连锁故障的演化过程,按线路负载率识别下一故障线路,然而未能考虑系统的动态特性;

5)脆弱元件模型通过元件脆弱性评估确定下一故障线路,能够识别对系统冲击最大的 $N-k$ 故障场景;

6)复杂网络模型把电力系统抽象为由边和节点组成的网络拓扑模型,按给定模式攻击网络从而得到电网在连锁故障下的结构脆弱性评估;

7)概率风险模型结合概率推理方法和隐性故障模型进行故障传播路径搜索,给定初始故障后可生成相应的故障树并对不同故障链路进行风险分析。

上述模型均基于准稳态潮流进行连锁故障时序事件搜索,能够模拟元件相继过载的连锁故障演化过程,由于其避免了系统暂态过程的时域仿真,分析效率得以显著提高。

2 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索

尽管准稳态潮流方法在系统稳定裕度较高的连锁故障前期仍能较好地反映系统的演化特征,在连锁故障中后期却难以考虑对系统冲击最为严重的系统解列事件和相继切机事件,因而难以全面、准确地分析连锁故障的演化过程以及故障后果。因此需建立安控装置和继电保护启动条件校核规则库(event checkers),利用单次时域仿真参数轨迹进行动作判据校核,逐步形成次级时序事件并形成事件链路,最终对事件链路进行时域仿真进而评估故障风险。

2.1 自动解列装置模型

自动解列装置一般部署在两区域之间的联络线上。若两区域同调机群发生振荡且振荡中心点位于联络线上,当中心点电压持续小于整定电压达到设定时间,自动解列装置则跳开联络线。为了提高事件校核速度,这里采用联络线两侧电压相角差 $\Delta\theta$ 超过 180° 时自动解列装置动作的简化校核规则,且自动解列装置正确动作的概率为 0.999。

2.2 高频/低频切机模型

系统发生扰动后,发电机机端频率将偏离额定值,若频率偏离机组的正常运行范围,高频/低频切机装置将切除机组。高频/低频切机装置采用文献[20]定义的概率模型如式(1)所示。

$$P_{GT} = \begin{cases} 0.001, & f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{f - f_2}{f'_2 - f_2}, & f_2 < f \leq f'_2 \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{f - f_1}{f'_1 - f_1}, & f'_1 < f \leq f_1 \\ 0.999, & f > f'_2 \parallel f < f'_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:动作阈值 f_1' 、 f_1 、 f_2 、 f_2' 分别为 48.5 Hz、49 Hz、51 Hz 和 51.5 Hz;装置动作延时为 0.5 s。另外当发电机机端频率高于 55 Hz 或低于 45 Hz 时不经延时直接切除机组。

2.3 低压/低频减载模型

系统各区域选择电压/频率测量点,当系统出现无功/有功严重缺额使得电压/频率持续低于减载装置整定值达到动作时间,区域负荷按减载规则被切除。低压/低频减载装置同样采用文献[20]定义的概率模型如式(2)所示。式中 X 为减载装置测量的节点频率 f 或电压 V 。

$$P_{LS} = \begin{cases} 0.001, & X < X' \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{X - X'}{X'' - X'}, & X' \leq X \leq X'' \\ 0.999, & X < X'' \end{cases} \quad (2)$$

自动减载装置一般采用多轮次减载方案,这里所采用的减载方案如表 1 所示。其中各轮次的动作延时均为 0.5 s。

表 1 自动减载方案				
轮次	(f'', f') /Hz	减载量 /%	(V'', V') /(p. u.)	减载量 /%
1	(48.75, 49.00)	10	(0.82, 0.85)	5
2	(48.50, 48.75)	7	(0.78, 0.82)	5
3	(48.25, 48.50)	7	(0.75, 0.78)	5
4	(48.00, 48.25)	7	—	—

2.4 线路过流保护模型

线路过流保护采用隐性故障模型^[15],其动作概率模型如式(3)所示。

$$P_{LO} = \begin{cases} 0, & 0 \leq i \leq 0.1 I_{th} \\ 0.9 \times (10i - I_{th}) / 9I_{th}, & 0.1 < i \leq I_{th} \\ 0.9, & i > I_{th} \end{cases} \quad (3)$$

2.5 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法

基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索步骤如下:

- 1)输入系统初始运行工况和源发性故障,并把源发性故障加入到时序事件链中。
- 2)对时序事件链进行时域仿真,得到系统的受扰响应。
- 3)利用规则库中的各类 event checker 对系统受扰响应进行扰动事件搜索,记录安控装置和继电保护触发的新扰动事件。
- 4)检查安控装置和保护是否触发新的扰动事件。若是,选择最先发生的事件作为下一时序事件并刷新事件链,返回步骤 2)重新进行时域仿真;若否,转到步骤 5)。

- 5)输出时序事件链,统计负荷损失。
- 上述时序事件搜索方法的流程图如图 2 所示。

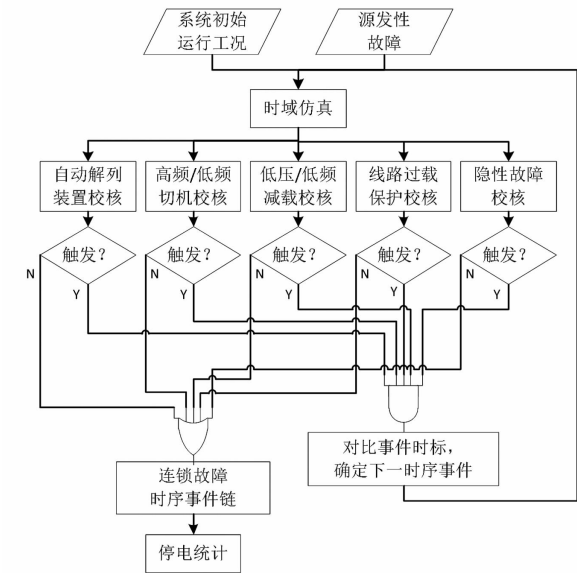


图 2 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法流程图

3 算 例

采用 PSD – BPA 时域仿真程序作为计算核心,利用 JAVA 开发所提的基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障仿真程序。以四川电网作为算例对象进行基于事件校核和连续时域仿真方法的连锁故障演化过程仿真和时序事件搜索。设置初始故障为 500 kV 线路“普提—洪沟” I 回线路无故障开断。仿真得到的时序事件如表 2 所示。

表 2 连锁故障时序事件		
No.	时间	事件
1	1"	500 kV“普提—洪沟” I 回开断
2	19.6"	220 kV“朱坎—南天”双回过载开断
3	30"	500 kV“普提—南天” I 回过载开断
4	40.8"	“普提—洪沟” II、III 回过载开断
...	...	...
5	41.36"	二滩机组高频切机
...	...	...
6	43.5"	临巴机组低频切机
...	...	...
7	44.26"	系统崩溃,大停电发生

图 3 ~ 图 6 分别为连锁故障演化过程中 500 kV 线路“南天—东坡”有功功率变化、二滩机组机端电压频率变化、临巴机组机端电压频率变化和尖山 500 kV 母线电压幅值变化。从图 4 ~ 图 7 可以得知,连锁故障前期,系统保持较高的稳定裕度,暂态过程各状态量偏移幅度较小,难以反映系统运行裕

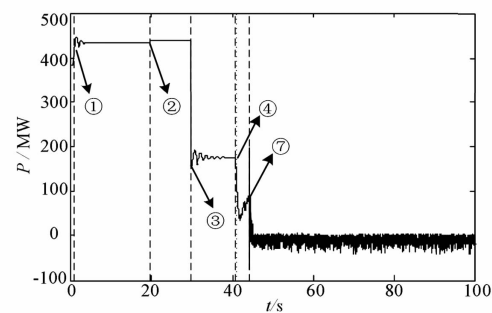


图 3 500 kV 线路“南天一东坡”有功功率

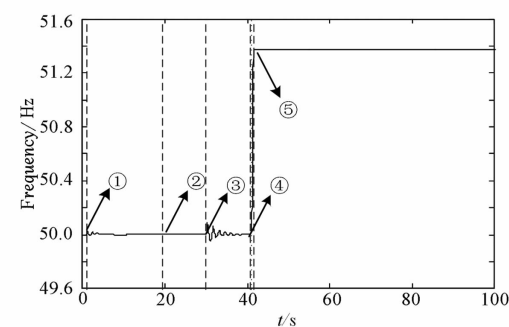


图 4 二滩机组机端电压频率

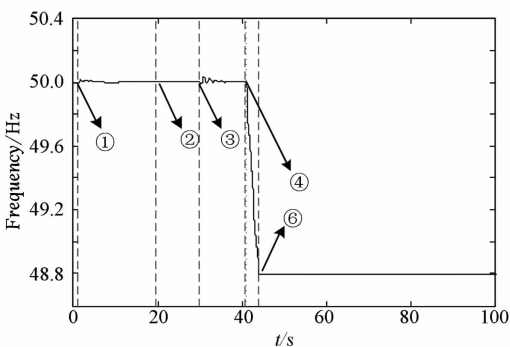


图 5 临巴机组机端电压频率

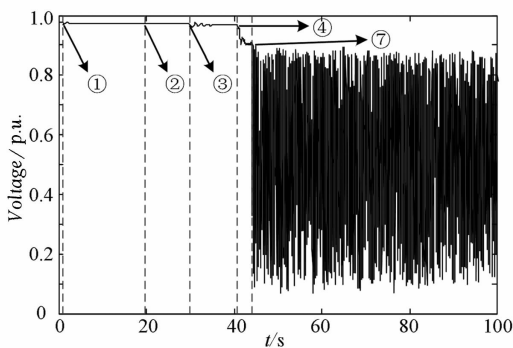


图 6 尖山 500 kV 母线电压幅值

度恶化的趋势。故障中后期,临界事件触发后各状态量剧烈振荡,大规模切机切负荷相继发生,随之系统发生大停电事故。

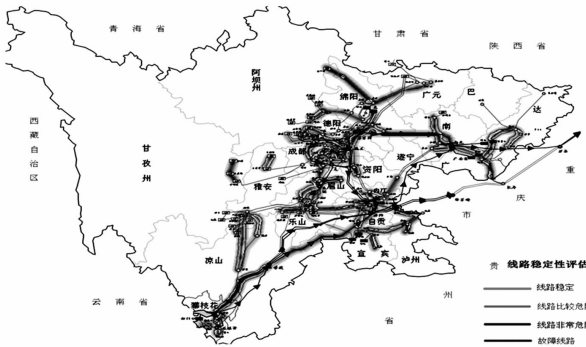
4 大停电智能预警系统

基于所提的连锁故障时序事件分析方法开发大

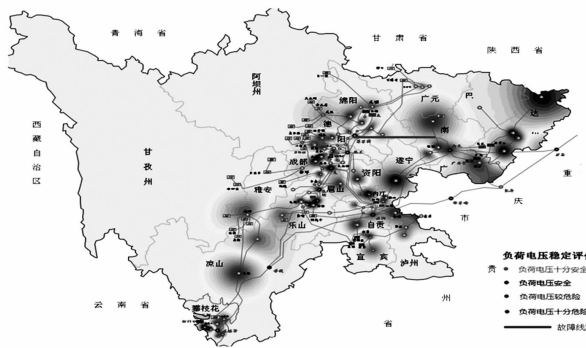
停电风险评估和智能预警系统。导入电网初始运行方式和源发故障,预警系统调用前述连锁故障时序事件搜索分析方法进行仿真,仿真完毕后返回系统状态量受扰轨迹、时序事件链以及停电信息。

此外,基于阶段脆弱性^[21]的概念,系统在准稳态和暂态阶段分别进行系统关键元件的评估和识别,并进行可视化预警。在准稳态阶段,系统进行基于源-荷节点对功率关联特性的脆弱线路辨识^[22]和基于 P-Q 解耦模型的节点电压脆弱性评估^[23],如图 7 所示。

在故障后暂态阶段,系统进行基于发电机转子动能进行风险机组辨识和基于支路势能进行脆弱线路辨识,如图 8 所示。

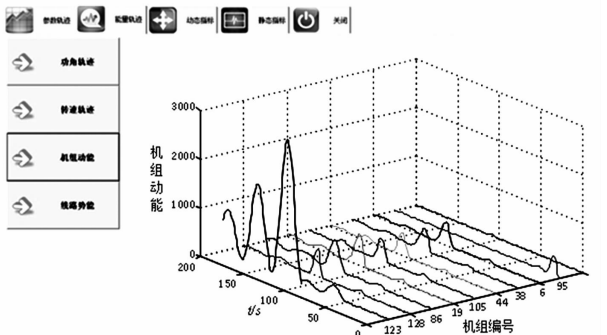


(a) 准稳态阶段线路脆弱性可视化预警

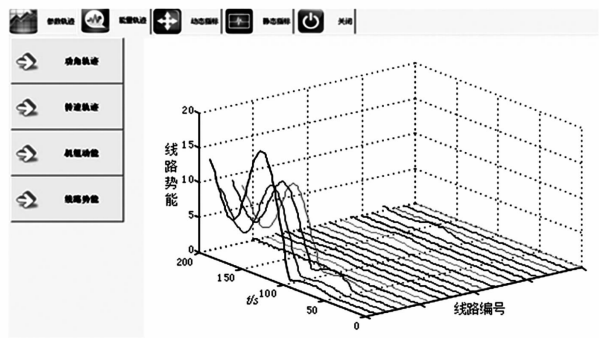


(b) 准稳态阶段节点电压脆弱性可视化预警

图 7 准稳态阶段关键元件识别及可视化预警



(a) 暂态阶段风险机组可视化预警



(b) 暂态阶段动态脆弱线路可视化预警

图8 暂态阶段关键元件识别及可视化预警

5 结 论

首先阐述了连锁故障的典型演化过程,回顾了近年国内外8次大停电事故,对其故障演变形态进行分类;然后对现有连锁故障研究方法进行综述,对其优缺点进行比较;为了克服准稳态潮流方法难以考虑连锁故障中后期系统解列事件和相继切机事件的缺点,建立安控装置和继电保护启动条件校核规则库(event checkers),提出采用基于事件校核和连续时域仿真的时序事件搜索方法,从而更准确地模拟连锁故障的演化过程和评估系统停电风险;最终结合所提连锁故障时序事件搜索方法和阶段脆弱性评估方法构建了可用于大停电风险评估和脆弱元件识别的可视化智能预警系统。

参考文献

[1] U. S. - Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [R/OL]. <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf>.

[2] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21):1-5.

[3] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11):1-5.

[4] Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy[R/OL]. http://www.rae.gr/old/cases/C13/italy/UCTE_rept.pdf.

[5] 华中电网“7·1”事故调查组技术组. 华中电网“7·1”事故调查报告[R]. 2006.

[6] Final Report System Disturbance on 4 November 2006[R/OL]. https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/ce/otherreports/Final-Report-20070130.pdf.

[7] 林伟芳,孙华东,汤涌,等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7):1-5.

[8] 林伟芳,孙华东,汤涌,等. 巴西“2·4”大停电事故及

对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2011,35(9):1-5.

[9] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25):167-174.

[10] 张国华,张建华,杨志栋,等. 电力系统 $N-K$ 故障的风险评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5):17-21.

[11] 刘友波,胥威汀,丁理杰,等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)——关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10):146-155.

[12] I. Dobson, B. A. Carreras, V. E. Lynch, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts[C] // Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, January 3-6, 2001, Maui, HI, USA: 710-718.

[13] 刁塑,刘友波,刘俊勇,等. 电力系统连锁故障的多层时序运行演化模型与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1):82-92.

[14] I. Dobson, B. A. Carreras, D. E. Newman, et al. A Probabilistic Loading-dependent Model of Cascading Failure and Possible Implications for Blackouts[C] // Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, January 3-6, 2001, Maui, HI, USA.

[15] J. Chen, J. S. Thorp, and I. Dobson. Cascading Dynamics and Mitigation Assessment in Power System Disturbances via a Hidden Failure Model[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005(27):318-326.

[16] D. S. Kirschen, K. R. W. Bell, D. P. Nedic, et al. Computing the Value of Security[J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 673-678.

[17] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2754-2761.

[18] C. Guo, Z. Dong, D. J. Hill, et al. Attack Structural Vulnerability of Power Grids: a Hybrid Approach Based on Complex Networks[J]. Physics A, 2010, 289: 595-603.

[19] 丁剑,白晓民,方竹,等. 基于贝叶斯网络的扰动后预想事故分析方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20):1-5.

[20] 于洋,黄民翔,辛焕海,等. 基于动态仿真的连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20):15-21.

[21] 刘友波,刘俊勇,杨嘉湜,等. 基于故障演化的电网阶段脆弱性及其可视化预警[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 46-52.

[22] 许立雄,刘俊勇,丁理杰,等. 基于网络流计数的关键线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 91-96.

[23] 魏震波,刘俊勇,李俊,等. 基于P/Q网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 19-22.

(收稿日期:2016-01-05)

基于 PSO - LSSVM 的短期电力负荷预测

黎津池

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:提出一种基于粒子群优化 - 最小二乘支持向量机 (particle swarm optimization - least squares support vector machine, PSO - LSSVM) 的短期负荷预测的方法。采用 PSO 算法对 LSSVM 的模型参数进行寻优,实现 LSSVM 参数的自动优化选取,进而得到比单一 LSSVM 更准确的短期负荷预测模型。实际算例结果验证了所提预测方法可行性,与其他方法预测结果的对比进一步突出了所提方法的有效性。

关键词:短期负荷预测;最小二乘支持向量机;粒子群优化算法

Abstract: A short - term load forecasting method based on particle swarm optimization - least squares support vector machine (PSO - LSSVM) is proposed. In this method, PSO is adopted to optimize the parameters of LSSVM model, thus to achieve automatic optimization of the parameters of LSSVM and further to obtain the more accurate short - term load forecasting model than a single LSSVM model. The simulation results show the feasibility of the proposed method, and the comparative results with other methods verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: short - term load forecasting; least squares support vector machine; particle swarm optimization

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)02 - 0006 - 04

0 引 言

短期负荷预测是电力系统的重要工作之一。准确的负荷预测可以经济合理地安排电网内部发电机组的启动和停止,保持电网运行的安全稳定,减少不必要的旋转储备容量,合理安排机组检修计划,有效地降低发电成本,提高经济效益和社会效益。

负荷预测的准确性与多种因素有关^[1] (如历史负荷数据和天气因素),而这些因素大部分具有随机性、动态开放性等不确定性特点。因此,未来负荷与所能利用的影响变量之间存在复杂的非线性关系。这就难以用简单的数学模型来描述,随着机器学习理论的发展,一些非线性模型如神经网络模型在短期负荷时间序列预测中已取得比较成功的应用^[2-6]。但神经网络模型本身存在着难以克服的缺陷,如易陷入局部极小,网络结构难以确定,而且它基于的是经验风险最小化原则,易导致过学习现象的产生。支持向量机 (support vector machine, SVM) 根据结构风险最小化准则取得最小的实际风险,其

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (61373047)

拓扑结构由支持向量决定,克服了传统神经网络拓扑结构 (权值及隐层数) 的选择在很大程度上依赖设计者经验的缺点,较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,具有很强的泛化能力^[7],并成功地应用于分类、回归和时间序列预测等方面^[8-9]。最小二乘支持向量机 (least square SVM, LSSVM) 是标准支持向量机的一种扩展,优化指标采用平方项,并用等式约束代替标准支持向量机的不等式约束,即将二次规划问题转化为线性方程组求解,降低了计算复杂性,加快了求解速度。然而,采用 LSSVM 模型进行负荷预测时, LSSVM 中的两个参数对模型有很大影响^[1],而目前参数的选取依然是基于经验^[10]上的,预测的误差就会很大。

所以,提出一种基于粒子群优化 - 最小二乘支持向量机 (particle swarm optimization - least squares support vector machine, PSO - LSSVM) 的短期负荷预测的方法,其结构图如图 1 所示。先采用 PSO 算法对模型参数进行寻优,将 SVM 的参数选择问题视为在给定空间的全局搜索问题,以测试样本集的平均误差作为算法结束的判断条件,实现了支持向量机参数的自动优化选取。最后将优化好的参数输入

已建好的 LSSVM 模型中实现负荷的预测,并对预测结果进行误差分析。

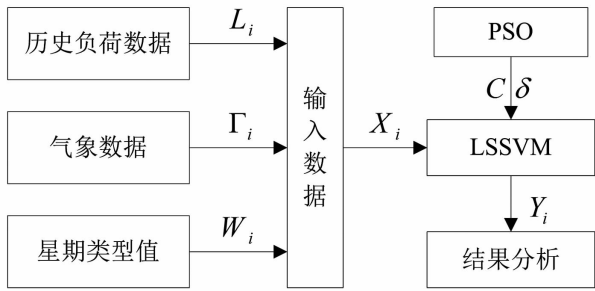


图 1 所提方法结构图

1 LSSVM 的基本原理

LSSVM 是支持向量机的改进,与标准 SVM 模型比较,该方法优势明显:1)用等式约束代替标准 SVM 算法中的不等式约束;2)将求解二次规划问题转化为直接求解线性方程组。下面介绍最小二乘支持向量机的实现原理并将其运用于时间序列的预测以验证其有效性。其基本原理^[1, 8-9]如下:

对于给定数据样本 \$(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, l, x_i \in R^n\$ 是与预测量密切相关的影响因素,如历史负荷数据、气象因素等,对非线性负荷预测模型,回归函数变为

$$f(x) = \omega \cdot \varphi(x) + b \quad (1)$$

式中: \$\omega\$ 为权值向量; \$b\$ 是阈值, \$\varphi(x)\$ 是从输入空间到高维特征空间的非线性映射。LS - SVM 优化目标可表示为

$$\min J(\omega, e) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^l e_i^2 \quad (2)$$

$$s. t. \quad y_i = \omega \cdot \varphi(x_i) + b + e_i, i = 1, 2, \dots, l$$

式中: \$e_i\$ 为误差; \$e \in R^{l \times 1}, \lambda \in R^{l \times 1}\$ 为误差向量; \$C\$ 是正规化参数,用以控制对误差的惩罚程度。引入 Lagrange 函数,式(2)可转化为

$$L(\omega, b, e, \alpha) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^l e_i^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\omega \cdot \varphi(x_i) + b + e_i - y_i) \quad (3)$$

式中, \$\alpha_i \in R^{l \times 1}\$ 为 Lagrange 乘子。根据 KKT (Karush - Kuhn - Tucker) 最优条件,可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum_{i=1}^l \alpha_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^l \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = C e_i, i = 1, 2, \dots, l \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow \omega \cdot \varphi(x_i) + b + e_i - y_i = 0, i = 1, \dots, l \end{cases} \quad (4)$$

消去 \$\omega\$ 和 \$e\$, 则式(4)的解为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Q^T \\ Q & K + C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l]^T\$; \$Q = [1, 1, \dots, 1]^T\$; \$I\$ 为单位矩阵; \$Y = [y_1, y_2, \dots, y_l]^T\$; \$K(x_i, y_i)\$ 为合适的核函数。对于非线性回归,使用一个非线性映射 \$\varphi(x)\$ 将数据映射到一个高维特征空间,再在高维特征空间中进行线性回归,其关键问题是核函数的选取,核函数是核技巧的基础,而核技巧是支持向量机的重要组成部分,核技巧是用原来输入空间中 2 个模式的简单函数的求值来代替高维空间中 2 个点的内积计算,不需知道具体的映射 \$\varphi(x)\$ 是什么,只需求出内积,即使得 \$K(x_i, y_i) = \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)\$。满足 Mercer 条件^[11]的函数都可以作为核函数。目前常用的核函数有多项式核函数、Sigmoid 核函数和高斯径向核函数 3 种,分别为

$$K(x, x_i) = [(x_i \cdot x_j) + \theta]^d \quad (6)$$

$$K(x, x_i) = \tanh[b(x_i \cdot x_j) + c] \quad (7)$$

$$K(x, x_i) = \exp(-\|x - x_i\| / 2\sigma^2) \quad (8)$$

Sigmoid 核函数有一定的局限性,因为该核函数中的参数 \$b, c\$ 只对某些值满足 Mercer 条件,多项式核函数中有 2 个可控参数 \$\theta\$ 和 \$d\$,而高斯核函数中只有 1 个参数 \$\sigma\$。通过对各核函数的测试,选取高斯核函数。确定了核函数,LSSVM 的预测模型表示为

$$y = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (9)$$

式中, \$\alpha_i\$ 与 \$b\$ 可由解式(5)的线性方程求出。

2 基于 PSO - LSSVM 的负荷预测模型

短期电力负荷预测对精确度有很高的要求,随着研究不断深入,电力负荷的预测理论和方法有了很大的进展,基于统计学习理论的 LSSVM 被用于负

荷预测中。不过在实际应用 LSSVM 过程中,一些关键的参数,如惩罚系数 C 与核宽度系数 σ 对模型有很大的影响,应该如何设置关键的参数,是这里要完成的任务。为此,首先需要完成输入样本的确定,然后建立基于 PSO 算法寻优的 LSSVM 模型,最后给出负荷预测步骤。

2.1 输入样本的确定

通过将母线历史负荷数据归一化处理后得到的母线负荷时间序列可表示为

$$\{L_j\}, j=1, 2, \dots, t$$

选取预测时刻的前四个时刻、前一天的相同时刻及前一天相同时刻的前后两个时刻的负荷值作为输入样本的一部分。

电力系统负荷具有一定的随机性,很多因素^[1, 9]都会影响负荷发生变化,输入样本中还着重考虑了预测日及预测日前一天的气象因素。主要考虑了一天当中的最高气温 $T_i^{\max}$ 、最低气温 $T_i^{\min}$ 、平均气温 T_i^{mean} 及空气相对湿度 S_i 。经归一化处理后记第 i 天的气象因素为

$$\Gamma_i = [T_i^{\max}, T_i^{\text{mean}}, T_i^{\min}, S_i] \quad (10)$$

根据负荷的周期性,将一个星期划分成不同的类型^[1],所以考虑了星期类型值 W_i (周一设 $W_i = 0.7$,周二到周五设 $W_i = 0.8$,周六记 $W_i = 0.4$,周日记 $W_i = 0.3$,节假日记 $W_i = 0.1$) 作为输入样本一部分。则预测第 i 天第 t 时刻的负荷 $Y_i(t)$,其输入样本可表示为

$$X_i(t) = [\Gamma_i, W_i, L_{24 \cdot (i-1) + t-4} : L_{24 \cdot (i-1) + t-1}, L_{24 \cdot (i-2) + t-1} : L_{24 \cdot (i-2) + t+1}, \Gamma_{i-1}, W_{i-1}], i=3, 4, \dots \quad (11)$$

2.2 基于 PSO 搜索的最优参数的确定及模型的建立

上面已经确定了径向基核函数,对于 LSSVM 来说,现在需要做的就是选取合适的参数,只有确定了参数 σ 和 C ,才能得到高精度的预测模型。这里引入了标准的 PSO 算法^[1]进行寻优。

2.2.1 标准 PSO 算法原理

假设在一个 d 维的搜索空间中,第 i 个粒子在 d 维的搜索空间中的位置是 x_i ,定义为

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}), i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

其飞行速度向量为

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}) \quad (13)$$

通过搜索定义目前种群局部的最优位置

$$P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{id}) \quad (14)$$

整个种群中的最优位置为

$$P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd}) \quad (15)$$

微粒速度和位置更新^[1, 12]如下式:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (16)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (17)$$

式中: m 为微粒数; d 为解空间的维数; c_1 和 c_2 是两个非负常数,称为加速常数; r_1 和 r_2 是随机在 $[0, 1]$ 之间选取的; w 为惯性权重系数。在 PSO 搜索的时候,用线性递减权重策略来处理动态惯性权重,会获得比较好的结果,方法如下:

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{t}{T_{\max}} \quad (18)$$

式中: $T_{\max}$ 为最大进化代数; $w_{\max}$ 为初始惯性权重; $w_{\min}$ 为进化至最大代数时的惯性权重。

2.2.2 最优参数的确定及模型的建立

设定 PSO 算法的搜索范围为 $C \in [0.1, 150]$, $\sigma \in [0.1, 10]$,这里粒子数 m 取 20 个。粒子数目越多,就更容易发现全局最优解,20 个粒子数相较于所取的样本数目已经足够了。最大迭代次数 $T_{\max}$ 取为 10。权重 $w \in [0.4, 0.9]$,学习因子 c_1 和 c_2 都取 2。利用 PSO 算法优化选择 LSSVM 的参数,并进行最终的预测,其流程图如图 2 所示。具体步骤如下:

1) 输入历史数据,对数据进行预处理,形成训练样本矩阵;

2) 初始化粒子群,并设置各个参数;

3) 计算各个粒子当前的适应值

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (19)$$

并比较,设置 P_{ibest} 和 G_{best} ;

4) 更新粒子的速度和位置,利用 PSO 算法完成种群的进化;

5) 计算进化后的种群各个粒子新的适应值,分别对 P_{ibest} 和 G_{best} 完成寻优替换;

6) 若达到 $T_{\max}$,则结束优化,输出优化的参数,否则,令 $t = t + 1$,转步骤 3);

7) 将优化的参数给 LSSVM,得到优化的预测模型,完成预测;

8) 将预测负荷与实际负荷进行比较,得到该日的负荷平均相对误差。

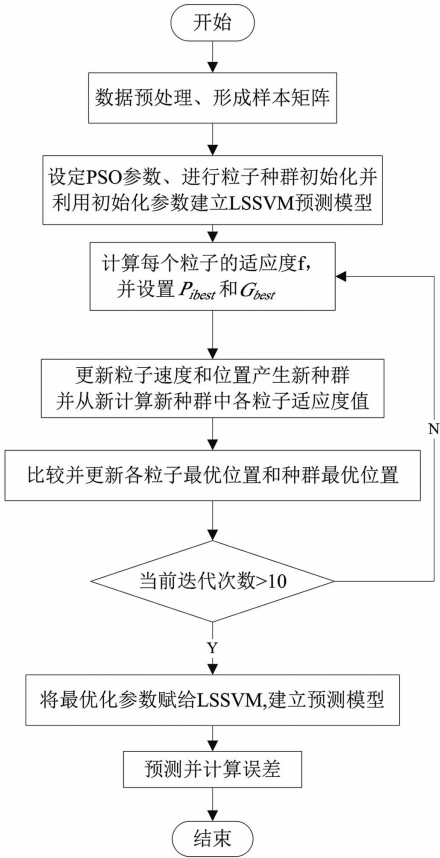


图 2 基于粒子群优化算法的预测模型流程图

3 算例分析

所采用的历史负荷数据为某地区 2009 年 2 月 14 日到 2009 年 3 月 27 日 (共计 $42 \times 24 = 1\,008\text{ h}$) 的时负荷数据,使用 LSSVM 预测模型与 PSO - LSSVM 预测模型对 3 月 25 日至 27 日每天的 24 个时刻负荷进行预测,计算出负荷预测的平均相对误差,对比两种方法的优劣,最后进行误差分析。

3.1 误差评价指标

1) 相对误差 (relative error, RE)

$$RE = \frac{|L_i - \hat{L}_i|}{L_i} \times 100\%$$
 (20)

2) 平均相对误差 (mean absolute percentage error, MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{L_i - \hat{L}_i}{L_i} \right| \times 100\%$$
 (21)

3.2 预测结果及误差分析

用 LSSVM 模型进行预测时,根据经验,其参数 C 取值为 30, σ 取值为 2, 27 日预测结果如表 1 所示,预测日负荷曲线与实际负荷曲线比较如图 3 所

示。LSSVM 模型参数经过 PSO 优化后自动获取值及每天预测结果的平均相对误差如表 2 所示。

表 1 负荷预测结果比较

时间	实际值	LSSVM		PSO - LSSVM	
		预测值	RE/%	预测值	RE/%
0:00	179.10	173.82	2.95	180.22	0.62
1:00	170.40	166.20	2.47	170.33	0.04
2:00	163.80	159.28	2.76	164.52	0.44
3:00	164.20	156.20	4.88	160.38	2.33
4:00	159.30	155.48	2.40	160.26	0.60
5:00	162.00	159.84	1.34	161.41	0.36
6:00	170.20	168.91	0.76	170.69	0.29
7:00	206.40	209.87	1.68	207.71	0.63
8:00	286.80	291.68	1.70	288.90	0.73
9:00	303.50	307.76	1.40	303.52	0.01
10:00	307.00	311.64	1.51	307.93	0.30
11:00	314.00	307.06	2.21	309.49	1.44
12:00	221.70	218.45	1.47	217.98	1.68
13:00	284.90	290.11	1.83	283.63	0.45
14:00	294.90	304.56	3.27	297.80	0.98
15:00	298.40	303.99	1.87	296.59	0.61
16:00	295.80	305.01	3.11	297.98	0.74
17:00	295.60	302.01	2.17	294.74	0.29
18:00	256.40	261.00	1.79	255.98	0.16
19:00	261.30	270.84	3.65	265.39	1.56
20:00	248.50	260.19	4.71	257.59	3.66
21:00	234.90	245.22	4.39	243.43	3.63
22:00	215.90	222.36	2.99	220.51	2.14
23:00	193.70	203.12	4.86	201.03	3.78

表 2 负荷预测平均相对误差的比较

日期	LSSVM			PSO - LSSVM		
	C	σ	MAPE/%	C	σ	MAPE/%
3 月 25 日	30	2	3.20	148.46	3.134 5	1.96
3 月 26 日	30	2	0.99	140.32	4.821 1	0.88
3 月 27 日	30	2	2.59	0.395 6	2.759 4	1.14

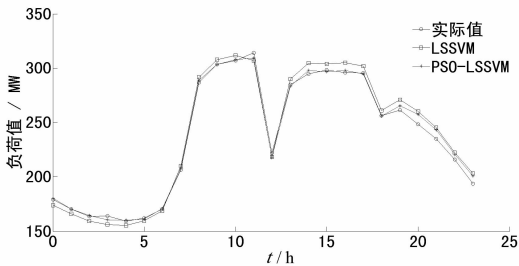


图 3 3 月 27 日日预测负荷曲线与实际负荷曲线比较

从以上预测的结果可以看出经过 PSO 算法优化 LSSVM 参数后所得预测结果的精度要明显高于基于经验选取 LSSVM 参数所得预测结果的精度。

(下转第 68 页)

笼型风电机组结构的风力发电系统运行仿真分析

赛尔山伙加·居曼¹,常喜强²,郭小龙²,张新燕¹
(1. 新疆大学电气工程学院,新疆,乌鲁木齐 830047;
2. 国网新疆电力调度控制中心,新疆 乌鲁木齐 830003)

摘要:在当今世纪能源日渐短缺、气候变化和环境日益恶化的全球背景下,风能作为一种清洁、可再生能源受到了高度的关注。介绍了笼型异步风力发电系统的类型和基本工作原理,并针对笼型异步风力发电系统建立了动态数学模型。其次,在 Matlab/Simulink 仿真环境下构建风电场并网系统的模型,通过仿真分析,研究笼型异步风力发电系统的稳定机理;并通过对风速扰动、线路断线故障、线路短路故障等各种扰动下的系统运行状况进行动态仿真,最后针对仿真结果提出提高系统稳定性的措施。

关键词:笼型风电机组;风力发电;系统运行;电压稳定性;动态仿真

Abstract:In the present century, energy is getting shorter, climate is changing and environment is becoming increasingly worse, so under this background, wind energy, a kind of clean and renewable energy sources, has attracted extensive attention. The type and basic working principle of cage asynchronous wind power generation system are introduced, and the dynamic mathematical model of cage asynchronous wind power generation system is established. Then, the model of wind power grid system is built using Matlab/Simulink. Through the simulation analysis, the stabilizing mechanism of cage asynchronous wind power generation system is studied, and the dynamic simulation of system operating condition is carried out under different disturbances such as wind speed variation, line breaking fault and short - circuit fault. Finally some conclusions are obtained, and the measures to increase the stability of cage asynchronous wind power generation system are proposed.

Key words:cage - type wind turbine generator system; wind power generation; system operation; voltage stability; dynamic simulation

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)02 - 0010 - 05

0 引言

由于传统的化石能源正在逐渐枯竭,风能作为一种储量巨大的可再生绿色能源,得到全世界的广泛重视和快速发展。随着风电的迅速发展,大规模风电场的陆续出现,风电装机容量在电力系统中所占的比例越来越大,风力发电对电力系统的影响也逐渐增大,严重故障情况下甚至会引起系统不稳定。因此,对各种扰动下的鼠笼式异步风力发电系统能否维持稳定运行进行研究,以及如何提高其运行的稳定性是十分必要的^[1-2]。

在 Matlab/Simulink 仿真环境下构建风电场并网系统的模型,而风电场并网系统是由鼠笼式异步

发电机构成的。研究笼型风电机组结构的风力发电系统的电压失稳机理,以及通过对线路断线故障、风速扰动、线路短路故障等各种扰动下的系统运行状况进行动态仿真,详细分析各种仿真过程,最后得出一些有意义的结论,并提出提高笼型风电机组结构的风力发电系统稳定性的措施。

1 风力发电机组动态数学模型

风力发电机组动态数学模型是由风速模型、风力机模型、传动机构模型以及异步发电机模型组成,见图 1^[3]。

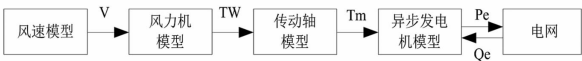


图 1 风力发电机组基本模型

基金项目:大规模风电光伏接入电网无功电压优化控制与综合评价技术研究(SGXJ0000DKJS1440234)

1.1 风速模型

风速具有明显的间歇性和随机性,在一般情况下,根据统计规律分析,风电场风速符合威布尔(Weibull)分布。

$$f(V)=\frac{K}{A}(\frac{V}{A})^{K-1}e^{-(\frac{V}{A})^K}\tag{1}$$

式中: V 是风速; $f(V)$ 是风速分布函数; A 、 K 分别是威布尺度系数和形状系数。为了精确描述风速间歇性和随机的特点,通常采用 4 种形式的风速来模拟实际风速变化情况:基本风 V_A 、阵风 V_B 、渐变风 V_C 和随机风 V_D 。

1.2 风力机与传动部分模型

1) 风能转换模型。风轮机主要包括齿轮箱、轮毂、叶片和传动轴等传动装置^[4]。叶片的作用是将风能转换成机械转矩。风力机的机械转矩关系式如式(2)。

$$T_w=\frac{1}{2\lambda}\pi\rho C_pR^3V_w^2\tag{2}$$

式中: T_w 为风力机的机械转矩; ρ 为空气密度; C_p 为风力机转换效率系数; R 为叶片半径; V_w 为作用于叶片的风速; λ 为叶尖速比, $\lambda=\omega R/V_w$ (其中: R 为叶片半径; ω 为风力机转速)。

2) 传动机构的模型^[5]。风力机组的传动机构由轮毂、齿轮箱和传动轴组成。轮毂连接叶片和齿轮箱,轮毂具有较大的惯性,齿轮箱和联轴器传递风力机和异步发电机之间的转矩,传动部分的模型为

$$\frac{dT_m}{dt}=\frac{1}{\tau_h}(T_w-T_m)\tag{3}$$

式中: T_m 为传动机构输出转矩; T_w 为传动机构输入转矩; τ_h 为风力机惯性时间常数。在简化模型中把齿轮箱位理想的刚性齿轮组,传动轴的惯量等效到发电机转子中。

3) 桨距角控制系统^[6-7]。风轮机风能转换效率系数是叶尖速率比和桨距角的函数。一旦风速变化风轮机运行点将发生变化,为了保证风能的转换效率和风轮机的平稳输出,把风轮机的桨距进行调整。风力发电机中桨叶的控制方式主要有两种:一种是定桨距风机,另一种是变桨距风机。变桨距控制系统一般用式(4)表示。

$$\frac{d\beta}{dt}=\frac{1}{\tau}(\beta_{ref}-\beta)\tag{4}$$

式中: β 为桨距角; β_{ref} 为由当前转速求得的桨距角的参考值; β_{ref} 是 C_p 与 λ 的函数,表示为 $\beta_{ref}=\zeta(C_p,$

$\lambda)$; τ 为变桨距控制系统的惯性时间常数。

1.3 异步发电机的模型

大量的研究表明,异步发电机的三阶机电暂态模型能较准确地描述其动态过程,如式(5)所示^[8]。

$$\begin{cases} T'_{d0}\frac{dE'_x}{dt}=-E'_x+(X-X')I_{sy}+2\pi f_0ST'_{d0}E'_y \\ T'_{d0}\frac{dE'_y}{dt}=-E'_y+(X-X')I_{sx}+2\pi f_0ST'_{d0}E'_x \end{cases}\tag{5}$$

式中: E' 为暂态电势,(p. u.); E'_x 、 E'_y 、 I_x 、 I_y 分别是暂态电势的实部和虚部、定子电流的实部和虚部; $X=X_1+(X_2X_m/X_2+X_m)$ 为等效暂态电抗,(p. u.); $T'_{d0}=(X_2+X_m)/2\pi f_0r_2$ 为转子绕组的时间常数; s 为转差率。

异步发电机的转子运动方程为

$$\frac{ds}{dt}=\frac{1}{T_j}(M_E+M_m)\tag{6}$$

式中: M_m 为发电机的机械转矩; M_E 为电磁转矩; T_j 为发电机的转子惯性时间常数。于是发电机的电磁转矩方程为

$$\begin{cases} P_e=-R_e[\dot{E}'I_s] \\ M_e=P_e/\omega \end{cases}\tag{7}$$

式中: P_e 为发电机的电磁功率,(p. u.); R_e 表示取实部; ω 为发电机角速度,(p. u.)。

2 基于 Matlab/Simulink 的异步风电场仿真

2.1 仿真系统概述

应用 Matlab/Simulink 仿真环境搭建的仿真系统模型,以某个风电场中的 8 台额定容量为 1.5 MW 的鼠笼式风力发电机组为例,系统拓扑结构如图 2 所示。其中将每两台鼠笼式异步风力发电机当作 1 台 2×1.5 MW 的鼠笼式异步风力发电机组来看,于是,风电场有 3 台 2×1.5 MW 风力发电机组构成的总装机容量为 9 MW 的模型。每台 2×1.5 MW 风力发电机组的出口电压为 575 V,经过升压变压器将其升压到 25 kV,然后通过 25 km 双回输电线路输送,并与 120 kV 无穷大系统相连。

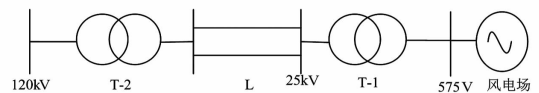


图 2 笼型异步风力发电系统图

2.2 仿真分析^[9-11]

首先研究了电压失稳机理,然后分别对风速扰动、线路断线故障以及线路短路故障3种状况下对风电系统的动态过程进行仿真,并且分析其对风电系统的稳定性和规律。

2.2.1 电压失稳机理研究

1)把25 km的输电线路假设成单回输电线路,在仿真过程中风速保持额定风速不变,额定风速为9 m/s, $t=3$ s时输电线路出现三相短路故障,0.12 s后切除故障,仿真时长为5 s。

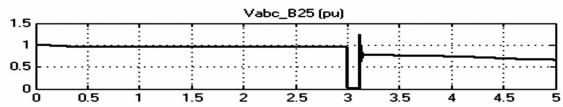


图3 电压失稳机理仿真图

从图3仿真曲线易知,系统发生故障时母线电压大幅下降,0.15 s故障切除后母线电压先有所回升,随后边振荡边电压持续下降,最后电压失去稳定。

2)与1)同等条件下,增大风电机组惯性时间常数 $H(s)$,母线电压的动态仿真图如图4所示。

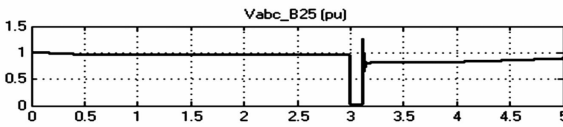


图4 增大风电机组惯性时间常数 $H(s)$ 的母线电压仿真图

与图3相比,0.15 s故障切除后母线电压开始回升,紧接着经过短暂振荡持续上升,电压重新恢复到原来的状态,电压依然保持稳定。

2.2.2 风速扰动

假设以8 m/s的最初时刻风速开始,经过3 s的上升时间,风速达到11 m/s,但在 $t=2$ s时刻时出现渐变风,渐变风的风速幅值为3 m/s,仿真时间为20 s。

1)当25 km输电线路为双回输电线路时,进行仿真系统分析,仿真结果如图5所示。

由图5可知,在风电系统双回输电线路状况下,电机的转速和有功功率随着风速的增大而逐渐增大,当风速上升到11 m/s时,风电场出口25 kV母线电压和风力发电机的无功功率随着风速的增大而减小。出现一段时间的波动,随后风力发电机的有功功率、无功功率、风电场出口25 kV母线电压和转速均达到某一稳定值并都稳定下来,因此,系统没失稳。

2)与1)相同条件下,当25 km的双回输电线路改为单回输电线路时,15 s时发生三相短路,故障

0.1 s后切除。仿真结果如图6所示。

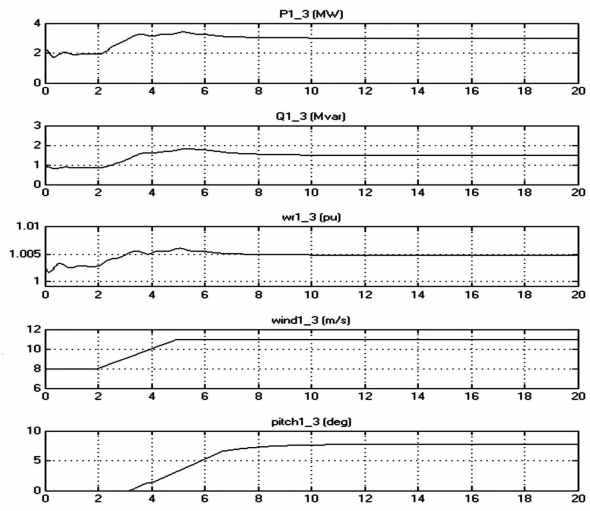


图5 双回输电线路时的风电系统仿真图

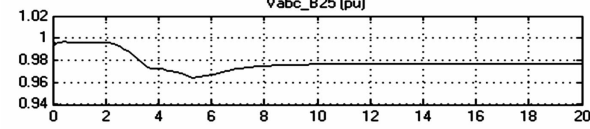


图6 单回输电的风电系统仿真图

由图6得知,输电线路是单回输电线路情况下,当风速上升到11 m/s时,风力发电机的有功功率和无功功率经过一段时间的变化后均迅速下降为0,风力发电机转速逐渐增大,系统崩溃。因此,系统失去稳定。

3)与1)相同条件下,当风速达到14 m/s时,仿真结果如图7所示。

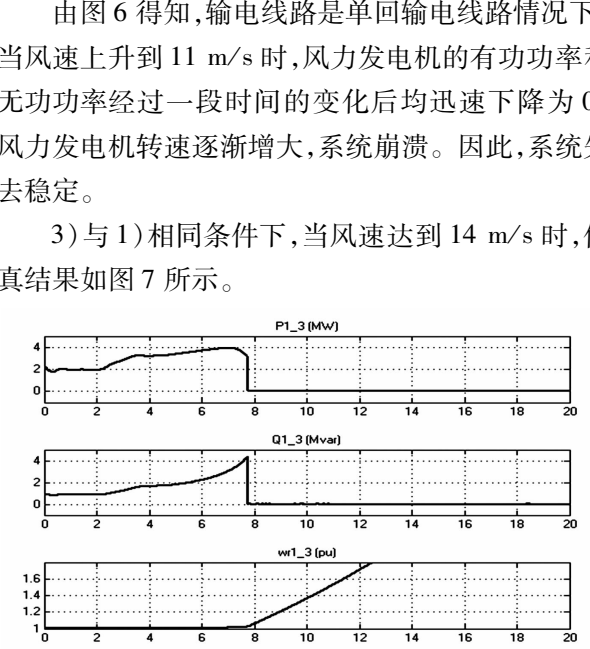


图7 双回输电的风电系统仿真图

由图 7 可知,在输电线路为双回输电线路情况下,当风速上升到 14 m/s 时,双回输电线路系统的性质与以上单回输电线路系统的性质相似。

4) 与 3) 相同条件下,在风电场出口处接入容量为 7 MVA 的无功补偿装置 STATCOM 后进行仿真,仿真时长为 50 s,结果如图 8、图 9 所示。

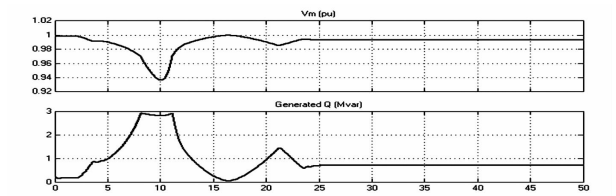


图 8 双回输电的风电系统中的 STATCOM 的仿真图

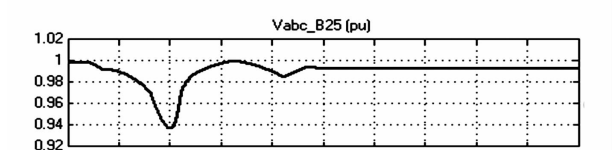
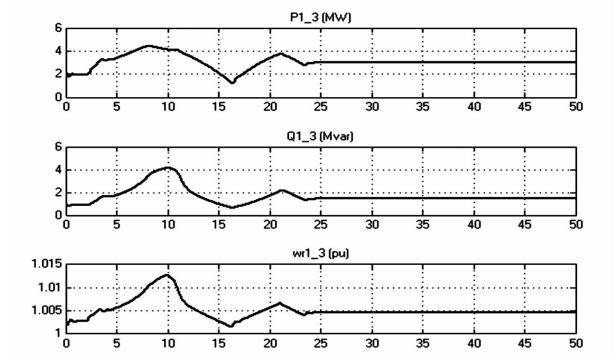


图 9 双回输电的风电系统接入 STATCOM 后的仿真图

由图 8 可知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出无功。由图 9 可知,在双回输电线路的风电系统接入 STATCOM 的情况下,当风速由 8 m/s 变到 14 m/s 时,随着风速的增大风力发电机的转速和有功功率逐渐增大;同时风力发电机的风电场出口 25 kV 母线电压和无功功率减小,经过一段时间的波动后,所有参数都在某一值稳定下来:因此,整个系统没失稳。

2.2.2.3 断线故障过程仿真

假设仿真过程中额定风速保持 9 m/s 不变,当仿真运行到 4 s 时,在 25 km 双回输电线路中的其中一回发生断线故障,仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当双回输电线路其中一回发生断线故障时,风力发电机的各个参数经过一段时间的波动后,都在某一稳定值附近稳定下来,因此,系统没有失稳。

2.2.2.4 短路故障

假设风速保持在额定风速 9 m/s 不变,当系统运行到 6 s 时,发生短路故障,仿真时间为 20 s。

1) 当近母线端发生三相短路故障时,系统运行到 0.09 s 后切除故障,仿真结果如图 11 所示。

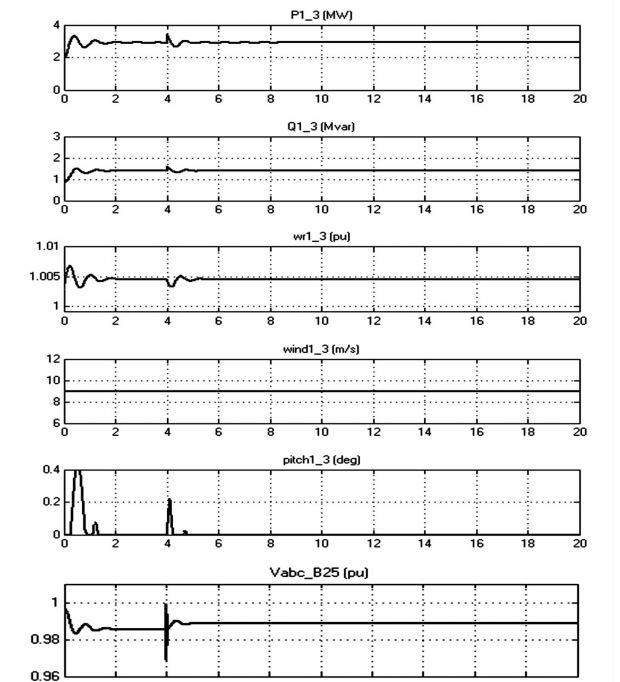


图 10 双回输电线路中的其中一回发生断线故障后的仿真图

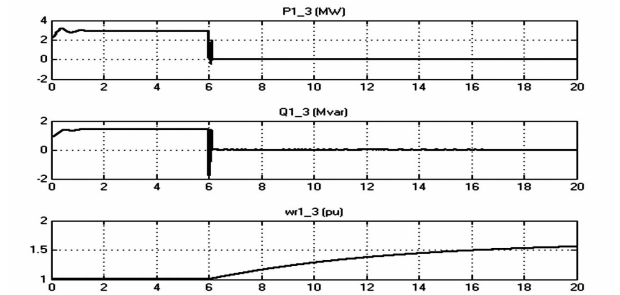


图 11 近母线端发生三相短路故障时的系统仿真图

由图 11 可知,在近母线端 6 s 时发生三相短路故障的情况下,风力发电机的有功功率和无功功率在一段时间的变化后均立刻下降为 0,发电机的转速会不断增大,系统崩溃。因此,整个系统失稳。

2) 在近母线端发生单相接地短路故障时,故障 0.09 s 后切除,系统仿真结果如图 12 所示。

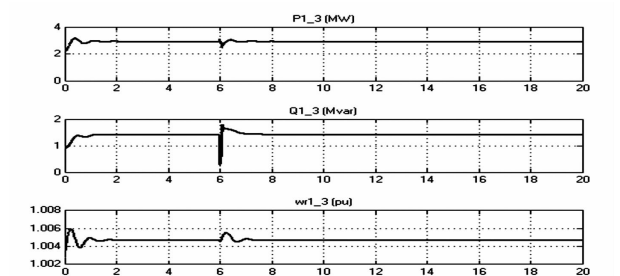


图 12 近母线端发生单相接地短路故障时的系统仿真图

由图 12 得知,近母线端 6 s 时发生单相接地短

路故障的情况下,当故障切除时间为 0.09 s 时,风力发电机的有功功率和无功功率以及转速在一段时间的上下波动后,其都在某一稳定值范围稳定下来。因此,整个系统没有失稳。

3)在远离母线端发生三相短路故障时,故障 0.09 s 后切除,系统仿真结果如图 13 所示。

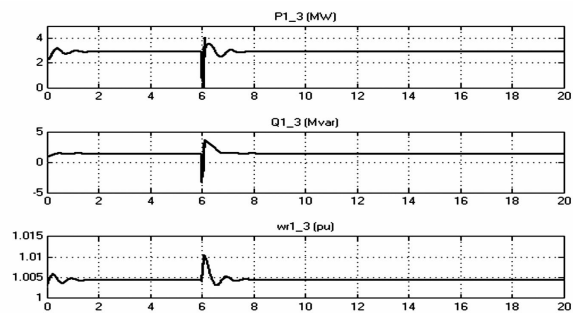


图 13 远母线端发生三相短路故障时的系统仿真图

由图 13 得知,在远母线端发生三相短路故障的状况下,其性质与近母线端发生单相接地短路故障时的性质相似。

4)与 1)相同条件下,在风电场出口接入 7 MVA 的无功补偿装置 STATCOM 后进行仿真,其结果如图 14、图 15 所示。

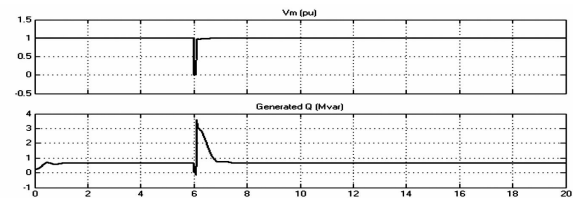


图 14 风电系统中的 STATCOM 仿真图

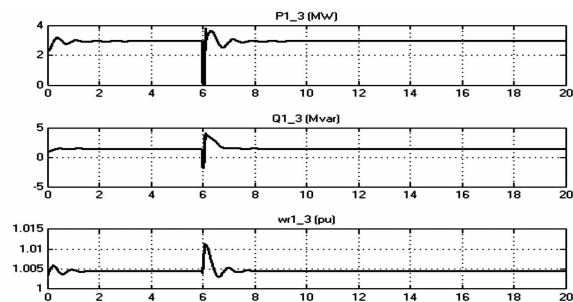


图 15 风电场出口接入 STATCOM 后系统的仿真图

由图 14 得知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出无功;由图 15 得知,当近母线端 6 s 时发生三相短路故障时,风电系统接有无功补偿装置 STATCOM 下的性质与以上的性质相类似。

5)与 4)相同条件下,故障 0.12 s 后切除,系统仿真结果如图 16、图 17 所示。

由图 16 得知,在仿真过程中无功补偿装置 STATCOM 发出负无功;由图 17 得知,当故障切除时

间为 0.12 s 时,风力发电机的有功功率和无功功率在一段时间的变化后迅速下降为 0,发电机转速不断增大。因此,整个系统失稳。

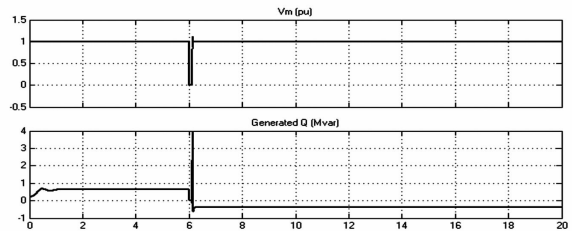


图 16 近母线端发生三相短路故障时
风电系统的 STATCOM 仿真图

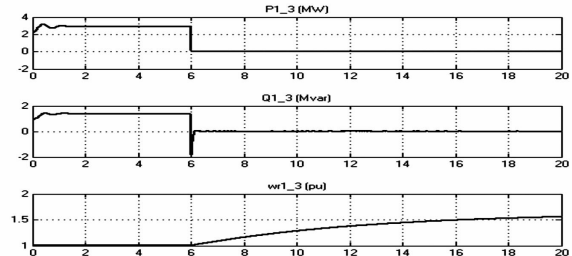


图 17 近母线端发生三相短路故障时
接入 STATCOM 后系统的仿真图

3 结 论

对由笼型异步风力发电机组组成的简单风电系统进行了动态仿真分析。主要结论如下:

1)由于鼠笼式风力发电机相当于一个无功负荷,需要从系统中吸收无功功率,所以需要在风电场出口安装无功补偿装置,这里选择用 STATCOM,通过仿真结果易知,对于一个失稳的风电系统,当接有无功补偿装置后,可以达到系统稳定运行。

2)在相同风速扰动情况下,双回输电线路比单回输电线路更有利于系统的稳定。因此,优化设计输电线路、增强线路的网架结构,有利于风电系统的稳定。

3)在相同的故障点和故障切除时间情况下,故障越严重越会影响系统稳定性。

4)在相同故障情况下,系统故障切除时间越短,越有利于风电系统的稳定。

针对以上结论,提出以下几种提高鼠笼式异步风力发电系统的稳定性的措施:1)改善风电机组的机械参数;2)优化网架结构;3)采用变桨距控制;4)添加动态制动电阻;5)添加动态无功补偿装置;6)快速切除故障。

(下转第 28 页)

并网光伏发电系统动态建模及仿真分析研究

陆 畅,冯政协,智勇军

(国网河南省电力公司平顶山供电公司,河南 平顶山 467001)

摘 要:以光伏发电系统工程应用需求出发,建立了光伏电池阵列详细数学模型,对光伏电池板特性进行了深入研究,并建立了直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路电磁暂态数学模型。对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统运行功能进行了分析,采用 Matlab/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

关键词:光伏发电;最大功率跟踪;升压斩波;动态建模

Abstract:Based on the practical requirements of photovoltaic (PV) power generation systems, the mathematical model of PV array is established, the output characteristics of PV panel is analyzed, and the electromagnetic transient models of DC – DC boost chopper, maximum power point tracking (MPPT) controller and three – phase inverter are presented. The output features of PV panel and the operation functions of PV power generation system are analyzed, and the effectiveness of the theoretical analysis is verified by the simulation results from Matlab/Simulink.

Key words:photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); boost chopper; dynamic modeling

中图分类号:TM615 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0015 – 05

0 引 言

随着传统化石能源的逐渐枯竭,绿色可再生能源得到了迅猛的发展。近年来太阳能光伏(PV)发电技术得到了各国的持续关注,已经成为利用太阳能的主要方式之一。光伏并网系统是世界光伏系统的主流应用方式,即光伏系统通过并网逆变器与当地电网相连,通过电网将光伏系统所发出的电能进行再次分配,如供给当地负载或进行电力调峰等^[1-5]。

随着光伏产业的迅速发展,光伏发电容量的大幅度提升,一些问题也相应地突显出来,例如光伏阵列发电效率低、光伏并网发电对电网影响大、并网逆变器需满足更高的要求等^[6-10]。作为光伏并网系统的核心和关键,并网逆变器需满足诸多的要求:实现最大功率跟踪,有功无功解耦控制,输出满足电网电能质量要求,具有更大的单体容量、更高的电压等级等^[11-17]。

针对光伏发电系统工程应用的实际需求出发,
科技项目: 国网河南省电力公司平顶山供电公司科技项目
(SGHAPD00JYJS1500490)

通过建立光伏电池阵列详细模型、光伏电池板特性研究、直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路模型,研究光伏发电系统的详细电磁暂态模型并给出了基于 Matlab/Simulink 的仿真波形,对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统整体运行功能进行了分析,验证了理论分析的正确性。

1 光伏电池阵列模型

当光照射到半导体上时,光子将能量提供给电子,电子将跃迁到更高的能态,在这些电子中,作为实际使用的光电器件里可利用的电子有:价带电子、自由电子或空穴、存在于杂质能级上的电子。光伏电池可利用的电子主要是价带电子,由价带电子吸收光子的能量跃迁到导电的过程决定光的吸收称为本征吸收或固有吸收。

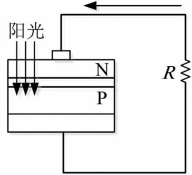


图 1 光伏电池原理示意图

如图 1 所示,光伏电池能量转换的基础是半导体 PN 结的光生伏特效应。如果将外电路短路,则外电路中就有与入射光能量成正比的光生电流流过,这个电流称为短路电流,另一方面,若将 PN 结两端开路,则由于电子和空穴分别流入 N 区和 P 区,使 N 区的费米能级比 P 区能级高,在这两个费米能级之间就产生了电位差,可以测得这个值,并称之为开路电压。

1.1 单体光伏电池数学模型

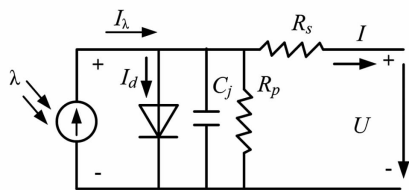


图 2 光伏电池精确等效电路模型

光伏阵列具有强非线性伏安特性,根据所需功率等级由一系列光伏组件串、并联形成,而光伏组件又是由一定数量小功率的光伏电池连接而成。图 2 为光伏电池精确的等效电路模型,它由光生电流源、并联二极管、并联结电容、并联电阻和串联电阻组成。光伏电池产生的光生电流 I_λ 与入射光的光照强度 λ 和光伏电池的面积成正比。流经二极管的电流 I_d 随着结电压 U_d 及反向饱和电流 I_0 不同而变化。

串联电阻 R_s 为电池的体电阻、电极导体电阻、电极和硅表面间接触电阻等组成部分的等效电阻,一般其值很小, R_s 约在 $7.7 \text{ m}\Omega \sim 15.3 \text{ m}\Omega$ 。并联电阻 R_p 是 PN 结和电池边缘的漏泄电阻等组成部分的等效电阻。一般来说, R_p 在 $200 \text{ }\Omega \sim 300 \text{ }\Omega$ 之间。由于光伏电池内器件的瞬时响应时间与绝大多数光伏系统的时间常数相比微不足道,因此结电容 C_j 在分析中常被忽略。参照图 2 中的电压、电流正方向,可以用式(1)描述光伏电池输出电流 I 。

$$I = I_\lambda - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

利用该式不可能求出负载电压 U 或电流 I 的显性表达式。定义 U_d 如下:

$$U_d = U + IR_s \quad (2)$$

$$I_\lambda = \lambda [I_{sc} + K_i(T - 298)] \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)得到

$$I = I_\lambda - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_d}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U_d}{R_p} \quad (4)$$

式中: A 为二极管的理想因子,一般在 $1 \sim 2$ 之间变化; K 为玻尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为绝对温度,单位为 K ; q 为电子电荷, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; λ 为光照强度, kW/m^2 ; I_{sc} 为标准测试条件光照强度 (1 kW/m^2) 及环境温度为 298 K 时所测得的光生电流,在标准测试条件下等式 $I_\lambda = I_{sc}$ 成立; K_i 为光生电流随温度变化系数,一般取 $K_i = 0.0017$ 。

1.2 光伏电池特性研究

假设太阳光照强度和温度不发生变化,光伏电池的输出特性曲线如图 3、图 4 所示。

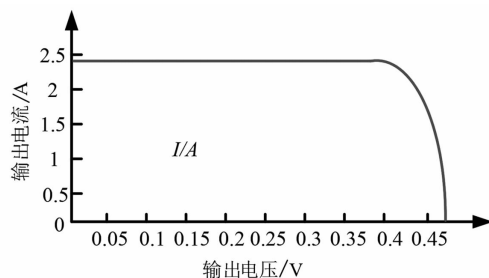


图 3 光伏电池 $I-U$ 曲线

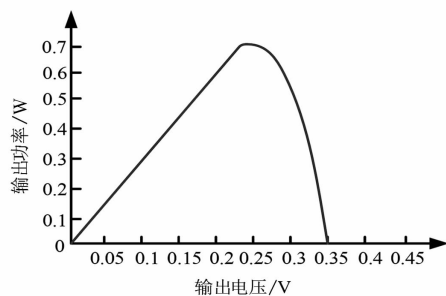


图 4 光伏电池 $P-U$ 曲线

从图 3 和图 4 可以看出,在一定的光照强度和温度下,光伏电池所输出的电压和电流在一条曲线上变化,同时输出的功率也在随之变化。其中,在 $P-U$ 曲线中存在一点,此时光伏阵列的输出功率最大,此点称为光伏阵列的最大功率点 (maximum power point, MPP),其对应的电流值为最大功率点电流 I_m ,对应的电压值为最大功率点电压 U_m ,由 I_m 和 U_m 构成的矩形面积也是该曲线所能包含的最大矩形面积,称为光伏电池的最大输出功率 P_m ,可由式(5)得出

$$P_m = U_m \times I_m = F_F \times I_{sc} \times U_{oc} \quad (5)$$

式中, F_F 表示光伏电池的填充因子或曲线因数。

3 直流斩波电路模型及 MPPT 算法

3.1 直流升压斩波电路模型

如图 5 所示,DC/DC 变换环节主要作用是调节光伏阵列的工作点,一方面使其工作在最大功率点,另一方面维持输出电压的相对稳定,使系统输入具有比较宽的电压范围。DC/DC 环节可以采用多种形式的拓扑结构,通过调节 DC/DC 变换器的占空比来实现对直流输出电压的控制。

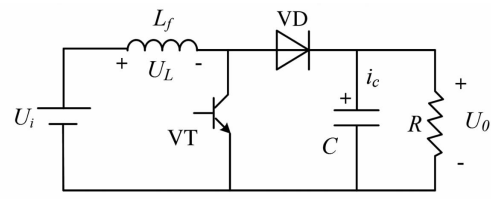


图 5 Boost DC/DC 变换器电路

Boost 变换器是输出电压 U_o 等于或高于输入电压 U_i 的单管不隔离直流变换器,如图 5 所示。由图 5 可见,Boost 变换器中电感 L_f 在输入侧,一般称为升压电感。开关管 VT 为 PWM 控制方式,但它的最大占空比 D 必须限制,不允许在 $D = 1$ 情况下工作。当开关 VT 导通时,电感 L_f 开始储存能量,电感电流随之增加,二极管 VD 截止,电容 C 向负载供电,此时, $U_L = U_i$ 。

当开关 VT 截止时,由于电感电流不能突变,电感电流逐步减小,产生感应电动势,感应电动势电位左负右正, $U_L < 0$,使得单向二极管 VD 导通,并与电源一起经过二极管向负载供电,同时向电容充电,此时, $U_L = U_i - U_o$,由于 $U_L < 0$ 成立,所以输出电压大于输入电压,因此,这种变换器适用于蓄电池电压高而太阳能光伏输出电压低的情况。一般来讲,Boost 变换器存在电感电流连续(包含临界状态)和电感电流断续两种工作模式。

1) 电感电流连续工作模式

工作于电感电流连续模式时,电路在 1 个开关周期内相继经历 2 个开关状态。分析如下:

当 $t = 0$ 时,驱动开关管导通,二极管 VD 反偏截止,使输入输出隔离,输入的能量储存在电感中不能输出,电感电流线性上升。两端呈现正向电压 $U_L = \infty$ 。

当 $t = t_{on}$ 时,开关管关断,输入的能量与电感储存的能量一起传给负载,假定电路中所有的元件均为理想元件,不考虑电路中功率损耗,电感两端电压 $U_L = U_i - U_o$,电感释放能量,电感电流线性衰减。电压在一个周期内的积分等于 0,则有

$$U_i t_{on} + (U_i - U_o) t_{off} = 0 \tag{6}$$

因此,输出电压与输入电压和占空比的关系为

$$U_o = \frac{U_i}{1 - D} \tag{7}$$

式中, D 为开关管占空比。

2) 电感电流断续工作模式

升压型电路中电感电流连续的临界条件为

$$\frac{L}{RT} = \frac{D(1 - D)^2}{2} \tag{8}$$

电感电流断续时,总是有 $U_o > U_i / (1 - D)$,且负载电流越小, U_o 越高。在大多数情况下,Boost 电路的输出均接在蓄电池或逆变器直流侧。在较小的系统采样时间内,Boost 电路的 U_o 变化很小,故可得

$$U_i = U_o (1 - D) \tag{9}$$

在双级式光伏系统中,Boost 电路的输入电压即为光伏方阵的输出电压。由式(9)可知,调节 D 即可改变输入电压,从而达到最大功率跟踪(MPPT)目的。可见,如果 D 过小, U_o 将会小于蓄电池的端电压,从而无法对蓄电池充电,因此 D 存在一个最小值 D_{min} 。设 Boost 电路的输入电压为光伏方阵的开路电压 U_{oc} ,可得

$$D_{min} = 1 - \frac{U_o}{U_{oc}} \tag{10}$$

Boost 电路的 D 在 U_i 变化时,可控制光伏方阵的输入电压在 0 与方阵开路电压之间变化,光伏方阵在最大功率点处的电压 U_m 可通过调整 D 来实现。

3.2 最大功率点跟踪方法

采用基于恒电压跟踪法(CVT)的 MPPT 方法,其原理如图 6 所示。当环境温度为 25℃ 时,光照强度由 1 000 W/m² 变化到 250 W/m² 时,MPP 分布在同一条垂线两侧,最大功率点处输出电压变化不大,近似认为是恒定的。因此,只要保持光伏电源输出电压等于某一光照强度下的最大功率点的输出电压值,就能基本保持光伏电源以最大功率输出。实际上是把 MPPT 控制转换为恒电压控制,这是 CVT 控制的理论依据。

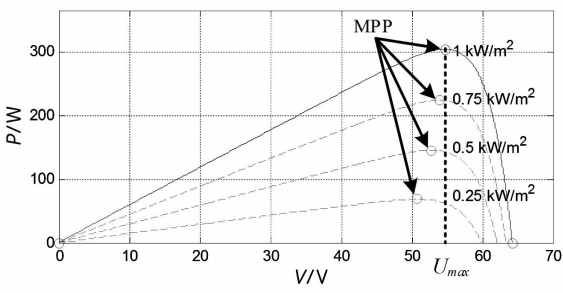


图 6 MPPT 恒电压跟踪法

4 并网逆变器电路模型

以三相两电平并网逆变器为例,建立了相应的电路模型,并利用坐标变换进行了等效简化,从而为后续并网逆变器控制方案的设计提供理论依据。并网逆变器的直流侧接到光伏阵列的输出端,假设电网为理想电网 LCL 滤波电感为线性电感,逆变侧滤波电感的等效电阻以及功率开关器件的等效电阻用 R_1 表示,并网侧滤波电感等效电阻用 R_2 表示,同时忽略线路上的寄生电阻,基于三相 LCL 滤波器的并网逆变器拓扑结构如图 7 所示。

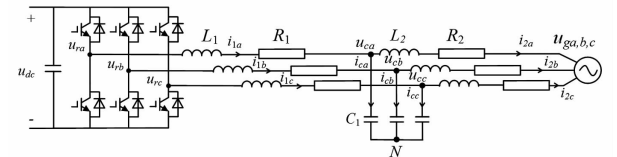


图 7 基于 LCL 滤波的并网逆变器拓扑结构

其中, u_{rabc} 和 i_{1abc} 分别表示并网逆变器的输出侧电压和输出侧电流; u_{cabc} 和 i_{cabc} 分别表示交流侧滤波电容的电压和电流; i_{2abc} 和 u_{gabc} 分别表示并网侧电流和并网电压。当电网电压对称时,根据 KVL 和 KCL 定理建立如下所示的 LCL 滤波器微分方程。

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1k}}{dt} + R_1 i_{1k} = u_{rk} - u_{ck} \\ C_1 \frac{du_{ck}}{dt} = i_{1k} - i_{2k} \\ L_2 \frac{di_{2k}}{dt} + R_2 i_{2k} = u_{ck} - u_{gk} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $k = a, b, c$ 分别表示各相上的状态方程。LCL 滤波器在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的数学模型如图 8 所示。

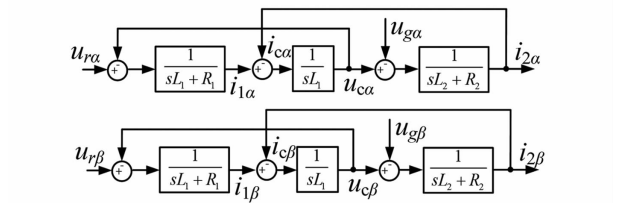


图 8 $\alpha\beta$ 静止坐标系下 LCL 滤波器数学模型

5 仿真分析

5.1 光伏电池模型仿真

根据光伏电池峰值功率 $P_{\max}$ 、开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 V_{mp} 、最大功率点电流

I_{mp} , BP Solar SX3 190 光伏电池在不同光照环境下 ($S = 1 \text{ kW/m}^2, 0.75 \text{ kW/m}^2, 0.5 \text{ kW/m}^2, 0.25 \text{ kW/m}^2$), 温度 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $I - U$ 和 $P - U$ 特性曲线如图 9 所示。

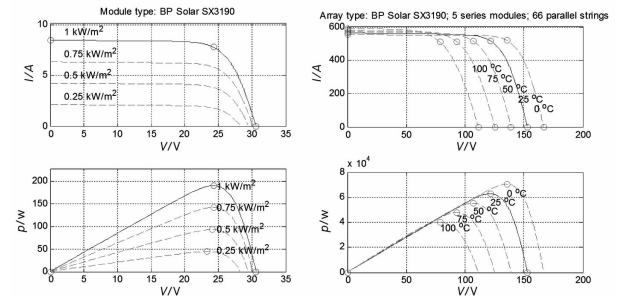


图 9 BP Solar SX3190 光伏模块不同光照 (不同温度) 下 $I - U, P - U$ 特性曲线

由图 9 可知,光伏电源既非恒压源又非恒流源,是一个非线性直流电源,在一定的温度下随着太阳光照强度的增加,光伏电源输出电流增加较大,而输出电压变化却较小。光伏电源输出的功率也随着输出电流的增加而不断的增大。由此得出如下结论:光照强度的增加使得光伏电源输出的功率增加;反之,光伏电源输出的功率会减小,因此具有正特性。

在一定的光照强度下,随着温度的变化,光伏电源输出电压变化较大,而输出电流变化较小,但是,温度的影响较光照强度的影响总体上要小得多。由此得出结论:温度的增加使得输出电压减小、输出电流增加,输出功率减少;反之,光伏电源输出的功率会相应增大,具有负温度特性。

5.2 光伏发电系统仿真分析

对三相光伏逆变系统进行了系统仿真,光伏系统通过 Matlab/Simulink 进行软件建模,其仿真模型如图 10 所示。100 kW 的 PV 阵列通过 DC - DC 升压变换器和三相三电平电压源逆变器连接到 25 kV 电网。详细模型包括以下几个部分:

- 1) PV 阵列:该光伏模块可以在 $1\,000 \text{ W/m}^2$ 的光照辐射下传送最大 100 kW 的功率。
- 2) 5 kHz DC - DC 升压变压器:升压变压器把 PV 的输出电压升高到 500 V。开关占空比通过 MPPT 优化,用了恒电压跟踪的最大功率跟踪方法,MPPT 自动改变占空比以产生需要的电压并且达到最大功率。
- 3) 三相三电平逆变器:逆变器将 500 V 的直流电压变换到 260 V 的交流,并且保证单位功率因素。逆变器控制系统采用了双环控制,外环控制环将直

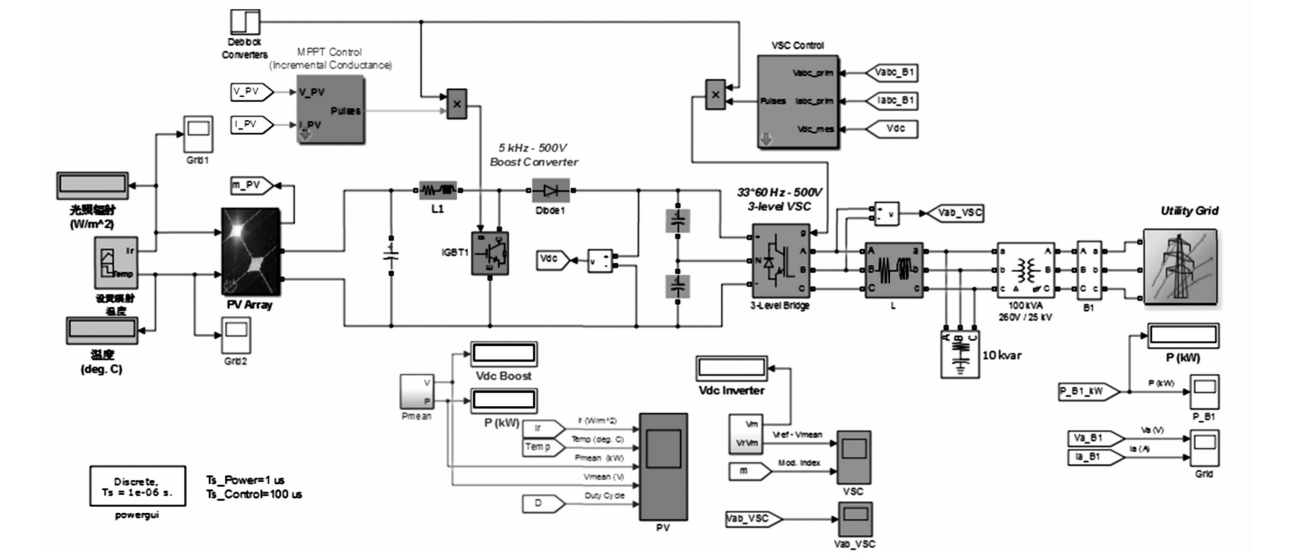


图 10 并网光伏发电系统仿真模型

流母线电压限制为 $\pm 250\text{ V}$, 内环控制分别调节 I_d

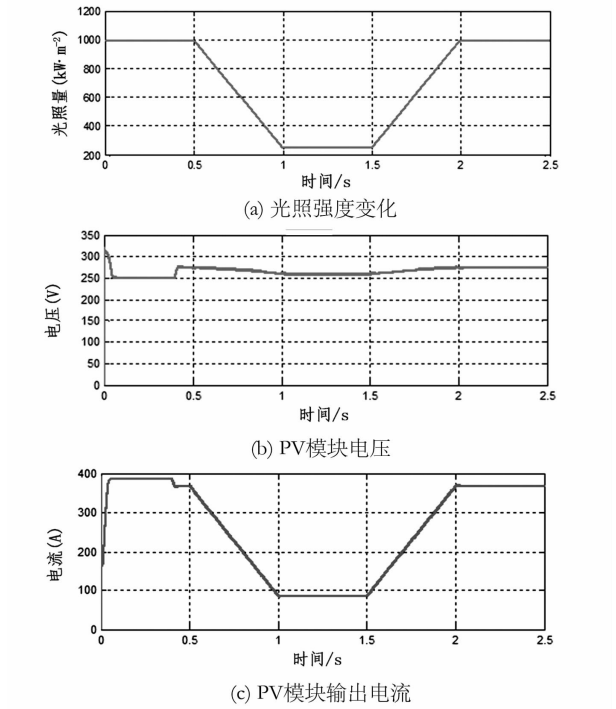


图 11 PV 模块的光照强度、模式电压和输出电流波形图
和 I_q 电网电流 (有功和无功电流)。 I_d 电流参考量是 DC 电压外部控制器的输出, I_q 电流参考设置为 0 以实现单位功率因数。电流控制器 V_d 和 V_q 电压输出被转换成了 3 个调制信号用于 PWM 控制波形。电流/电压控制系统以及 PLL 同步单元都采用了 $100\text{ }\mu\text{s}$ 的采样时间。为了得到更好的 PWM 波形, 升压单元的脉冲发生器以及 VSC 变换器采用了更快的采样时间 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

4) 电网:采用 25 kV 线路接入 120 kV 等效网络。

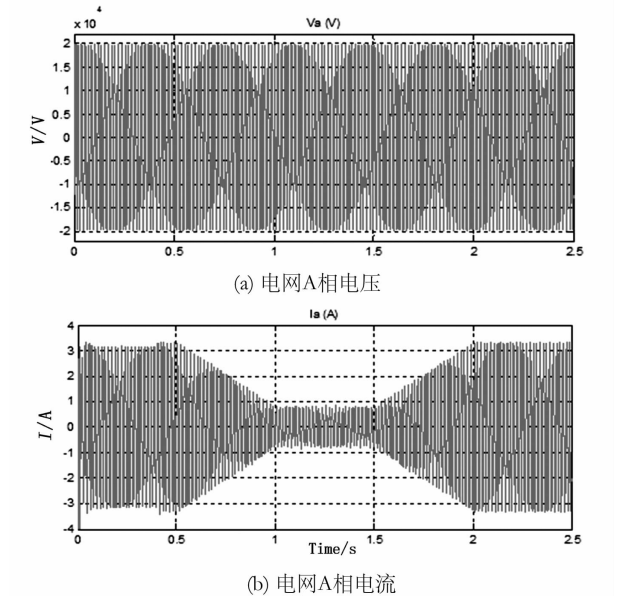


图 12 电网侧 A 相电压和电流波形图

仿真从标准状态开始 ($25^\circ, 1\text{ }000\text{ W/m}^2$), 温度保持不变。如图 11 所示, 在 $t = 0.5\text{ s}$ 时, 光照强度从 $1\text{ }000\text{ W/m}^2$ 逐渐降到 250 W/m^2 , 在 $t = 1.5\text{ s}$ 时, 光照强度逐渐恢复至 $1\text{ }000\text{ W/m}^2$; PV 模块电压基本保持不变, PV 模块电流变化趋势和光照强度基本一致, 从 400 A 逐渐降到 100 A 。

图 12 为电网 A 相的电压和电流波形, 由图 12 (a) 可知, 在光照强度变化时, 电网 20 kV 母线电压幅值保持恒定, 电网电流波形与光照曲线及光伏发电系统有功出力波形保持一致, 光伏发电系统始终处于最大功率跟踪状态。

(下转第 58 页)

特高压换流变压器阀侧套管 末屏铁磁谐振过电压分析

唐 明,丁理杰,汤 凡,陈 刚

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:研究了特高压换流站高端换流变压器阀侧套管末屏电压由高端阀组充电转连接过程所诱发的铁磁谐振过电压机理,并结合现场实际参数采用 PSCAD 电磁暂态仿真软件进行了详细分析。提出了依靠增大阻尼来抑制铁磁谐振的方法,并分析了其对末屏电压精度和相位的影响。

关键词:特高压;换流变压器;铁磁谐振

Abstract:Ferroresonance over – voltage mechanism of bushing end shield at valve side of ultra – high voltage (UHV) converter transformer caused by charging to connection is researched and analyzed in detail with PSCAD model based on the actual parameters of the site. A method of increasing the damping resistor is proposed to inhibit the ferroresonance , and its influences on the voltage accuracy of end shield and the phase are also analyzed.

Key words:ultra – high voltage ;converter transformer ;ferroresonance

中图分类号:TM713 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954 (2016)02 – 0020 – 04

0 引 言

随着中国“西电东送”能源战略逐步推进和进一步深化,特高压换流站的安全稳定运行成为维持清洁能源持续外送的重要保障。

溪浙特高压直流输电工程,作为目前川内输送容量最大的特高压线路,却经常受到各类线路故障、设备缺陷、通信阻塞等影响而不能满功率运行,其中换流变压器阀侧套管末屏处发生的铁磁谐振过电压故障在系统调试期间和投运之后均有发生。因此,对其进行机理研究和有效治理对特高压换流站的安全稳定运行意义重大。

铁磁谐振是一个长期困扰电力系统安全稳定运行的复杂问题,多发生于非线性电感与电容串联或并联的电路中,其所引发的谐振过电压、过电流可达额定电压、电流的数倍。铁磁谐振过电压不仅会在操作或故障的过程中产生,而且可能在暂态过程结束后的较长时间内稳定存在,不但威胁着电气设备的绝缘,还会产生持续的过电流烧毁设备,造成绝缘闪络、避雷器爆炸等严重的停电事故。

特高压换流变压器阀侧套管末屏是阀侧绕组电压的重要监测节点,与其后的电压采集器共同构成

了典型的电容式电压互感器结构。特高压换流站在投入高端阀厅时进行的充电转连接操作将会通过与换流阀并联的 RC 回路耦合至换流变压器的阀侧绕组产生暂态扰动,使电压采集器中的电感进入饱和区,在换流变压器阀侧套管末屏和电压采集器构成的回路中形成稳定的铁磁谐振现象。

研究了特高压换流站换流变压器阀侧套管末屏铁磁谐振的机理,并基于 PSCAD 电磁暂态仿真软件对故障进行了仿真,给出了多种抑制措施及其优劣分析。

1 套管末屏铁磁谐振过电压故障梳理

2015 年 7 月,特高压宜宾换流站极 II 高端阀组由充电转连接的过程中,阀组 A、B、C 3 套保护同时发出“YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障”告警,如图 1 所示。

故障前,极 I 高端、极 I 低端、极 II 低端均为满载运行,直流侧双极功率 6 000 MW。极 II 高端 6 台换流变压器均已充电,但换流阀仍处于闭锁状态。此时宜宾换流站的极 I 出线电压为 + 800 kV,极 II 出线电压为 – 400 kV。在将极 II 高端投入运行的过程中,转连接过程的操作示意图如图 2 所示(其中

加粗部分为带电路路)。

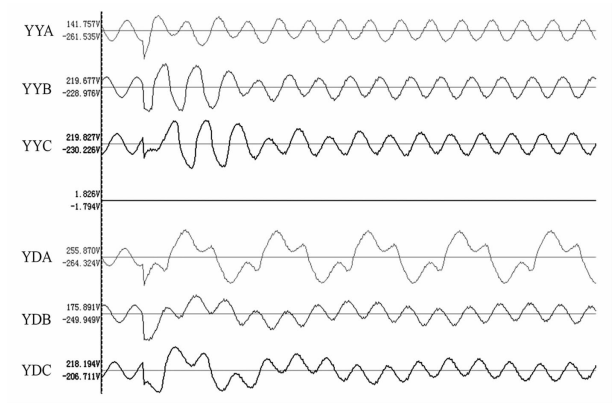


图 1 极 II 高端各换流变压器阀侧套管末屏电压录波

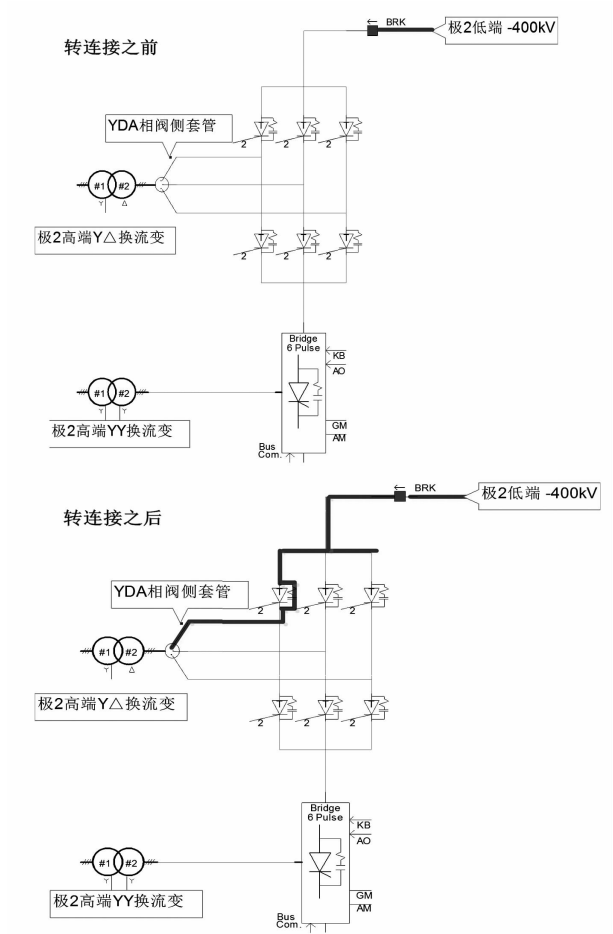


图 2 极 II 高端阀组充电转连接示意图

转连接操作使极 II 高端出线刀闸闭合与极 II 低端 -400 kV 极线相连,此操作将导致极 II 低端的 -400 kV 通过阀组间并联的 RC 阻容回路耦合至换流变压器的阀侧套管,形成扰动。图 2 中加粗部分为 -400 kV 电压对极 II 高端 YDA 相换流变压器阀侧套管的传导回路(其他换流变压器及其传导回路未画出)。

由图 1 所示的极 II 高端各换流变压器阀侧电压

录波可以看出,充电转连接的操作给 6 台换流变压器均造成一定程度的负向电压跌落,其余 5 台换流变压器的阀侧绕组末屏电压经过短暂的过渡过程均能回到稳态。只有 YDA 相换流变压器的阀侧套管末屏电压产生了稳定的谐振过电压现象。对其电压进行傅里叶频谱分析,结果如图 3 所示。

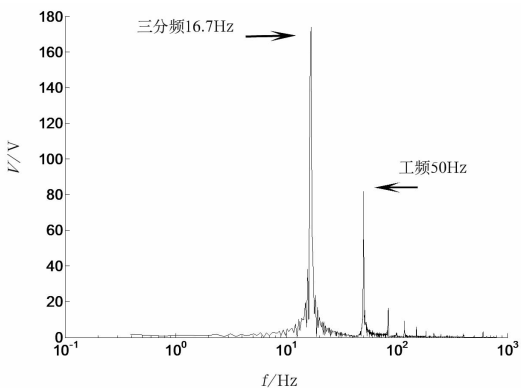


图 3 末屏谐振电压的频谱分析

由图 3 可以看出,工频分量的幅值约为 82.3 V,1/3 次谐波的分量幅值约为 167.9 V,约为工频分量的 2 倍左右。进一步分析可知,1/3 次谐波的相位约滞后工频分量 $\pi/2$ 。由上述数据分析可以初步认定极 II 高端 YDA 相换流变压器阀侧套管末屏发生了典型的 1/3 分频铁磁谐振现象。

换流变压器阀侧套管末屏分压原理及其谐振回路如图 4 所示。

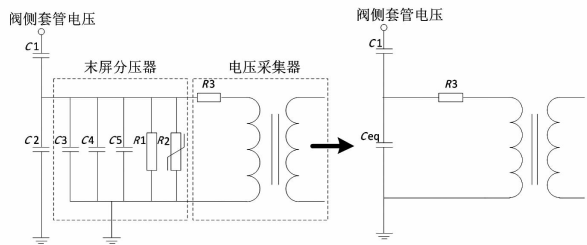


图 4 套管末屏谐振回路

电压采集器的核心元件为一台含有铁心的变压器,如图 5 所示。

该电压采集器内部由 3 个结构参数完全一致的小 TV 组成,主要完成 ABC 三相电压变换功能,变比为 50:1,其中 A 通道的具体电路如图 6 所示,主要参数如表 1 所示。

需要特殊说明的是,特高压换流站均采用 3 套保护,且“国家电网公司十八项重大反事故措施”规定 3 套保护必须经由 3 个不同 TV 采集而得,禁止由同一端口引入。因此每台换流变压器的阀侧套管末屏均与 3 套电压采集器并联,其等效阻抗将变为

单台阻抗的 1/3。



图 5 电压采集器实物图

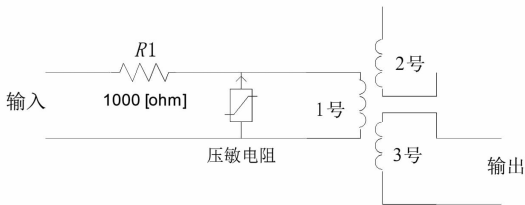


图 6 电压采集器一路通道具体电路

表 1 电压采集器的主要参数

参数	数值
R_1/Ω	1 000
一次侧非饱和阻抗/k Ω	333
一次侧漏抗/ Ω	175
一次侧直阻/k Ω	1.42
一次侧额定电压/V	63.51
一次侧非饱和电感/H	1061

该变压器的励磁特性曲线如图 7 所示。

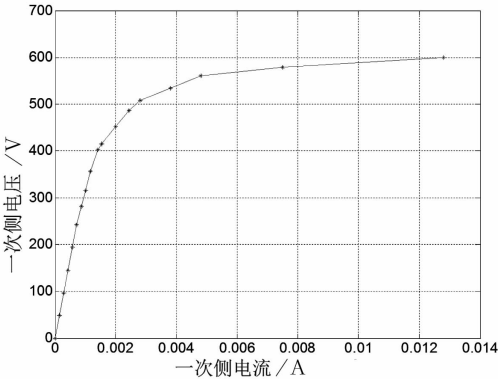


图 7 单台电压采集器的励磁特性曲线

2 铁磁谐振的 PSCAD 仿真

图 8 所示为铁磁谐振的 PSCAD 模型主体部分，为充分模拟现场工况，各元件参数均与现场实际保持一致。

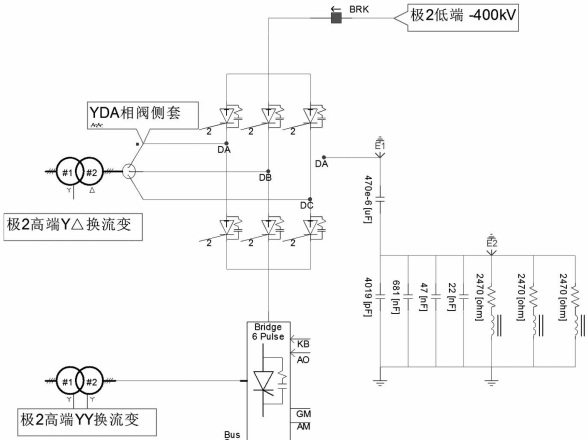
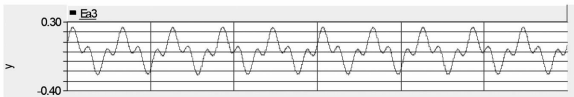


图 8 换流变压器阀侧套管铁磁谐振的 PSCAD 模型

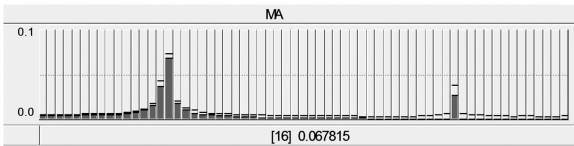
采用断路器加恒压源的模式来模拟换流站极 II 高端阀组充电转连接的操作，电压采集器的伏安特性曲线采用图 7 中的测试结果，仿真结果及其与录波图的对比如图 9 所示。



(a) 套管末屏电压的仿真结果



(b) 套管末屏电压的录波图



(c) 仿真结果的频谱分析

图 9 套管末屏电压的 PSCAD 仿真结果及录波图

仿真结果表明，套管末屏两端电压，在充电转连接的操作下，确实有可能进入稳定的分频谐振状态，在现场参数的条件下，仿真结果也是三分频的幅值约为工频分量幅值的两倍。

3 铁磁谐振抑制措施及其优劣分析

通常，工程界认为铁磁谐振现象的产生主要取决于回路的容抗和感抗的比值 X_c/X_L ：

- 1) 当 $X_c/X_L = 0.01 \sim 0.07$ 时，发生分频谐振；
- 2) 当 $X_c/X_L = 0.07 \sim 0.55$ 时，发生基频谐振；
- 3) 当 $X_c/X_L = 0.55 \sim 2.8$ 时，发生高频谐振；
- 4) 当 $X_c/X_L < 0.01$ 或 $X_c/X_L > 2.8$ 时，较难发生谐振。

因此，可以通过调整容抗和感抗的比值来降低铁磁谐振发生的概率。

1)减小容抗及其优劣

增大阀侧套管的末屏电容或在末屏分压器两端并联更多的电容可以达到减小容抗的目的。然而阀侧套管的末屏电容很明显无法改变,在其两端并联更多的电容虽然可以实现但将改变其分压系数,二次屏柜的保护、测控等系统需要重新整定,且过低的电压对其 AD 采样精度也带来更大的挑战。

2)增大感抗及其优劣

对电压采集器的励磁特性进行重新设计可以增大其感抗,也可以通过串联更多的电压采集器来实现,但均会导致设备体积的增大。

增大电抗可以限制励磁电流,等效于提高了铁磁材料的饱和点,但这种方法受限于铁磁材料的特性,不能无限提高其饱和点。而在阀组充电转连接的操作过程中, - 400 kV 的电压扰动能量非常大,电压采集器将无可避免地进入饱和区。因此增大感抗的方法作用有限。

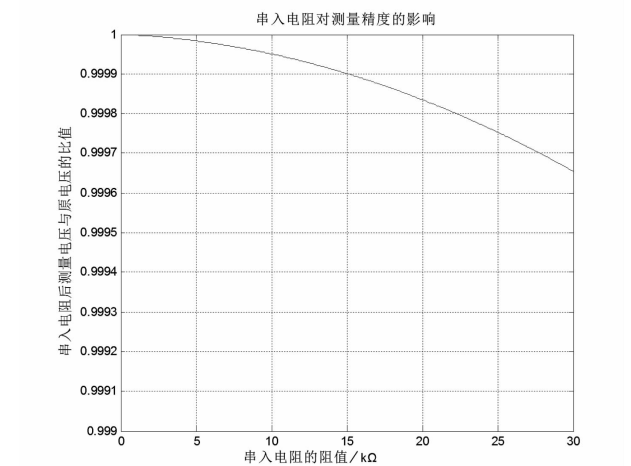


图 10 串入电阻对电压采集器精度的影响

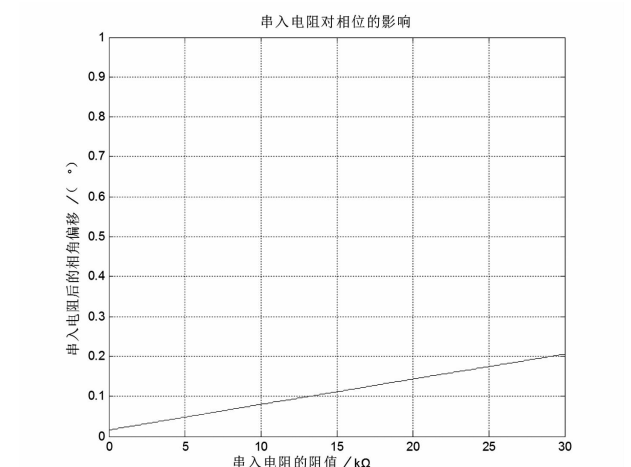


图 11 串入电阻对电压采集器相位的影响

3)增大阻尼

既然 - 400 kV 的扰动无法避免,那么限制和尽快消耗饱和区储存的多余能量才是防止其进入稳态

谐振的有效方法。在现有的电压采集器中,一次侧串联了 1 kΩ 的电阻,适当增大该电阻的阻值是提高阻尼最简单易行的办法。PSCAD 仿真结果表明,将电阻阻值提高至 5 kΩ 以上,将不会发生稳定的谐振。阻值增加之后对电压采集器精度和相位的影响如图 10 和图 11 所示。

由图 10、图 11 可知串入电阻对电压采集器的精度和相位的影响非常有限。在串入电阻为 10 kΩ 时对精度的影响在万分之一以内,相位误差在 0.1° 以内。在有效抑制铁磁谐振的同时对二次侧保护和测控的影响非常小。

4 结 论

特高压换流站高端阀组在充电转连接的操作时所产生的激励电压会对高端阀厅中的 6 台换流变压器阀侧绕组造成很大扰动,容易造成换流变压器阀侧套管末屏电压进入稳定的铁磁谐振状态。前面分析了该类故障的诱因及其形成机理,并通过 PSCAD 电磁暂态软件结合现场实际参数进行了仿真,结果表明在一定的参数配合下,阀侧套管末屏电压确有进入稳态谐振的风险。提出了增大电压采集器内部电阻来抑制谐振的方法,分析了其对电压采集精度和相位的影响,为特高压换流站的安全稳定运行提供了有力的理论支撑。

参考文献

[1] 李俊. 500kV CVT 铁磁谐振问题研究[J]. 电测与仪表,2010,47(7A):65 - 68.

[2] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[3] 秦祖泽,黄绍平. 电容式电压互感器分频铁磁谐振新的分析方法[J]. 高压电器,1997(4):19 - 22.

[4] 黄治国,雷红才,苗青,等. 电容式电压互感器分频谐振的分析与对策[J]. 高电压工程,2004,30(7):58 - 59.

[5] 杨鸣. 铁磁谐振过电压非线性特性及其柔性抑制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[6] 王世凯. 小电流接地电力系统铁磁谐振消谐装置的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2007.

[7] 张博,鲁铁成,杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析[J]. 高电压技术,2007,33(1):31 - 35.

[8] 刘凡. 中性点直接接地系统铁磁谐振过电压的混沌特性与控制检测方法[D]. 重庆:重庆大学,2006.

作者简介:

唐 明(1986),博士、工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期:2015 - 11 - 13)

1 000 kV GIS 超声波在线检测系统设计与应用研究

汤会增

(国网河南省电力公司检修公司,河南 郑州,450007)

摘 要:提出了 1 000 KV GIS 超声波局部放电在线检测系统整体设计方案,并对系统的硬件和上位机界面进行设计。信息采集处理单元以 TMS320 单片机为控制核心,基于 AD620 的前置放大单元具有较高检测精度。运用 1 000 kV GIS 超声波检测系统对 4 种绝缘缺陷进行模拟试验,得出超声波检测法的特点。该系统成功发现某 1 000 kV GIS 盆式绝缘子故障,工程实际应用效果良好。

关键词:超声波;TMS320;GIS 局部放电;前置放大器

Abstract:An overall design scheme of on - line detection system for ultrasonic partial discharge in 1 000 kV gas insulated switchgear (GIS) is presented, and the hardware part and software part of detection system are designed. Information acquisition and processing unit takes TMS320 single - chip microcomputer as control core, and the preamplifier unit based on AD620 has a higher precision. Through the simulation tests of four conventional insulation defects by ultrasonic detection system in 1 000 kV GIS, the characteristics of ultrasonic detection system are summarized. The proposed system has successfully found a basin - type insulator damage in 1 000 kV GIS, which has a good engineering practical application effect.

Key words:ultrasonic; TMS320; GIS partial discharge; preamplifier

中图分类号:TM595 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)02 - 0024 - 05

0 引 言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是将断路器、隔离开关、接地开关、母线等多种设备全部封闭在充满 SF₆ 气体(作为绝缘和灭弧介质)金属外壳中的组合式开关电器^[1],1 000 kV GIS 是特高压输变电工程中的关键设备,一旦出现故障,将可能造成电网重大事故发生^[2]。绝缘降低是 GIS 设备故障的主要原因,对 GIS 进行在线局部放电(partial discharge, PD)检测可有效掌握 GIS 内部绝缘状况,预防 GIS 故障跳闸造成电网事故。GIS 发生局部放电时会产生包括纵波、横波和表面波的声波向四周传播,超声波检测法,即用超声探头检测局部放电处的超声、振动信号,是目前监测 GIS 设备局部放电的有效方法之一^[3]。

1 检测系统设计

1.1 检测原理及结构

超声波测量法原理如图 1 所示,超声波传感器安装在 GIS 外壳上,不会对 GIS 运行和操作产生任何影响,其通常测量 20 ~ 100 kHz 频率范围,可以剔除外界的干扰信号,获得较好的信噪比,抗电磁干扰性能好,原理简单,可以实现放电类别识别和定位,易于实现在线监测。

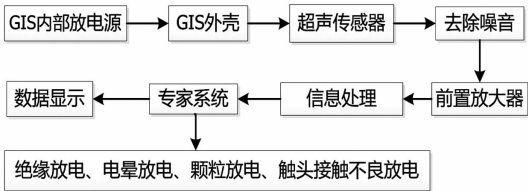


图 1 超声波在线检测系统原理框图

在 1 000 kV GIS 外壳或盆式绝缘子上装设超声波探头,超声探头实时采集 GIS 放电信号并将这些信号用光纤传输到光中继站,转化为电信号后经过放大、处理和存储后,有上位机软件进行分析处理,并提供显示、打印及远传。系统结构框图如图 2 所示。

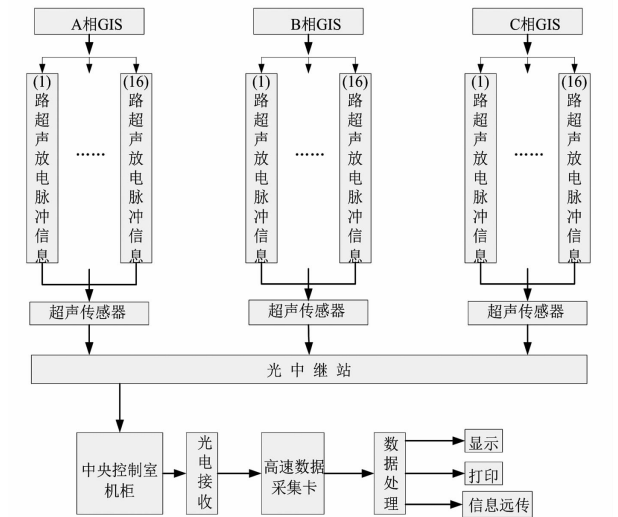


图 2 局部放电在线监测系统结构框图

1.2 定位方法

GIS 局部放电伴随相应的超声脉冲,超声传感器接收同一放电声波的时间因在 GIS 上的安装位置不同而有所差异,可利用 PD 产生的声电信号时间差对 PD 进行空间定位。超声传感器与放电源距离 S 的关系为 $S = t_n \times C$ 。式中: t_n 为放电点产生的超声波信号到达 n 号传感器的时间; C 为横波在壳体中的传输速率。通过对某相同信号的时间差、幅值进行同步记录,求出距多个传感器的距离 $S_1, S_2, \dots, S_n$,通过对以上所求距离的组合分析来确定 PD 的坐标。

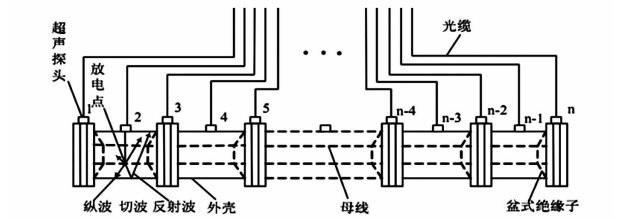


图 3 超声波探头的实际安装位置图

2 硬件系统

检测系统主要组成部分是超声波传感器、光中继站、前置功率放大器、多通道数据采集系统和上位机软件等。主要技术参数如下:超声探头为低频谐振式 NU40A18TR 传感器;通道数:48 个,用于监测 GIS 内部的放电;运用模式:66 路采用并行模式;超声脉冲特性:5 μ s;超声频率:30 ~ 220 kHz;相位外同步:50 Hz;使用电源:AC 220 V 500 W;光缆与电源线的安装:光缆是用 ST 头与传感器对接的;电源

线是用二通道的 $\Phi 3.5$ 插头对接的。

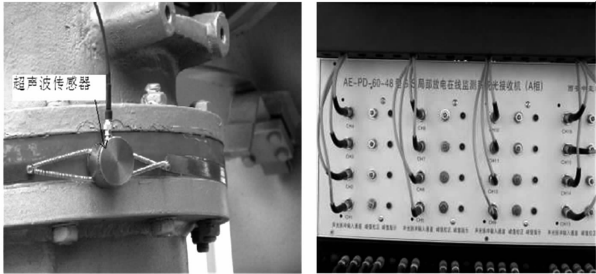


图 4 GIS 现场的超声波探头 图 5 现场小室光接收机

高灵敏度传感器对局部放电检测效果影响较大,系统采用压电陶瓷为材料的 NU40A18TR 外置式传感器,在局部放电产生的机械应力作用下利用压电陶瓷的正压电效应产生交变电场,声传感器将其转换为电信号,其输出电压 $V(t, x) = U(x, t) \times T(t)$, $U(x, t)$ 为表面位移波, $T(t)$ 为响应函数。利用此超声波传感器来接收 GIS 表面产生的机械振动,其灵敏度大于 -80 dB,频带在 17 ~ 220 kHz 之间,谐振频率 40 kHz,外观如图 4 所示。超声波传感器接收到的采样信号通过前端信号调理电路的处理后再经过射频耦合器隔离和高速 A/D 转换器将模拟信号数字化;最后再由 DSP(digital signal processor) 将转换过来的数字信号读取并存入 RAM 中。

由于超声波传播过程中衰减较快,因此需要选用增益较大的前置放大单元。如图 6 所示,前置放大电路采用增益可调的前置放大器 AD620,其输入端连接 2 个 0.1 μ F 耦合电容与 100 k Ω 的接地电阻 R_1, R_2 构成高通滤波器滤除低频噪声干扰,管脚 4、管脚 7 与电源相连接,管脚 5 与地相接,管脚 1、管脚 8 与电阻 R_g 进行连接, R_g 为增益可以调节的电阻。由图 7 可知,在保证信号不失真情况下获得最大增益, R_g 取 210 Ω 满足频率 40 kHz 左右信号检测要求,由此可得增益 G 为

$$G = R'_g / R_g + 1 \approx 230$$

式中, R'_g 为 AD620 的增益电阻,取值 49.9 k Ω 。

CPLD(complex programable logic device) 采用 Altera 公司 EPM7128S (PLCC84) 芯片, DSP 采用 TI 公司的 DSP TMS320C6713。基于 DSP 和 CPLD 的多通道分布式高速数据采集系统能够实现同时采集现场多个超声波传感器检测到的数据。在逻辑控制模块 CPLD 的作用下, DSP 控制信号能够产生同步采样信号,来控制不同信号的采集,以及模数转换模块进行采样和 A/D 转换。各模数采集卡中的数据由

DSP 读取并存储在 RAM 中,去除噪声干扰和取样分析工作也在 DSP 中完成,最后将处理后数据通过网络接口传送至上位机。

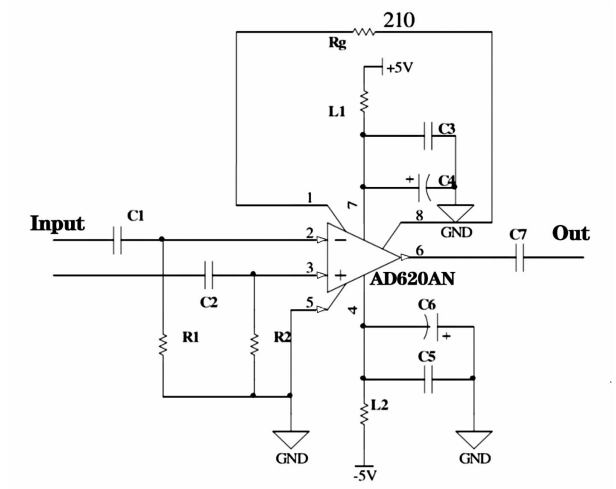


图 6 前置放大电路图

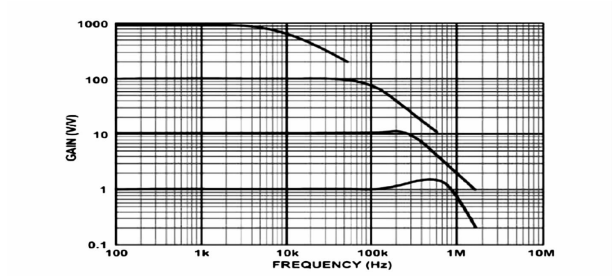


图 7 AD620 的频率与增益对应图

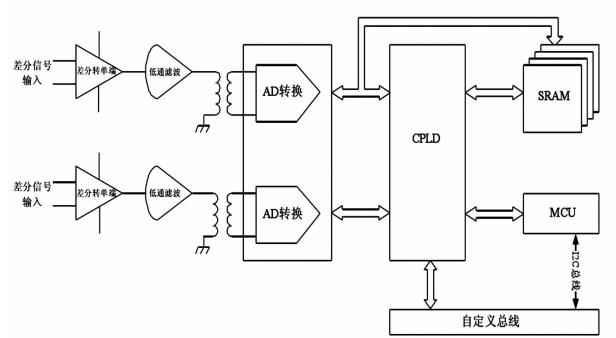


图 8 采样板系统框图

3 客户端软件设计

客户端软件采用专家系统进行数据分析处理,综合运用数字滤波、动态阈值等抗干扰方法,来消除或抑制噪声干扰,能够实现同时对多路超声波信号的同步采集、传输、滤波、分析、报警、放电类型识别、放电位置定位、放电趋势分析、二维($Q-\Phi$, $N-\Phi$, $N-Q$)和三维($N-Q-\Phi$)图表显示打印等功能。

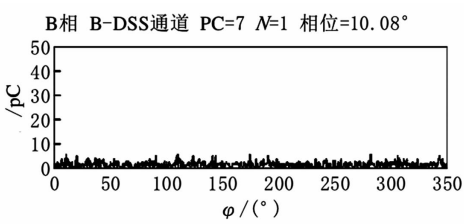


图 9 局部放电监测系统软件显示二维界面

4 常见局部放电类型模拟试验

利用上述设计的超声波在线监检测系统对 GIS 模型进行检测,根据图 10 所示组建测试系统电路,实际测试系统模型如图 11 所示。其中变压器采用工频试验变压器 200B4M-380 V/1 000 kV;限流滤波阻抗为工频试验保护电阻($GR\ 1\ 000-1/6$);超声波传感器为 NU40A18TR 低频谐振式传感器。

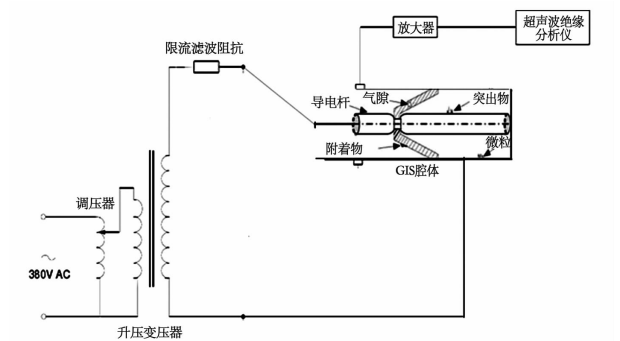


图 10 GIS 超声波局部放电测试系统电路图

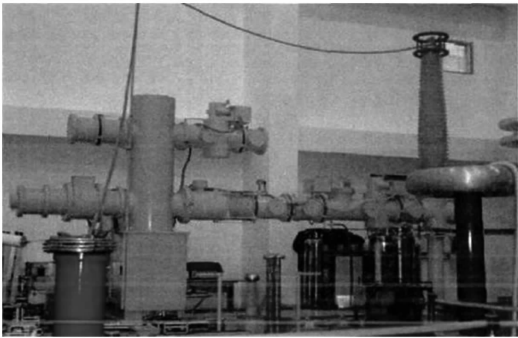


图 11 GIS 超声波局部放电测试系统模型图

在 GIS 模型内部分别设置 4 种绝缘缺陷:导电杆上系一根长约为 12 mm 的铜丝模拟突出物缺陷,绝缘子表面沾上直径 0.2 mm 铜丝模拟附着物缺陷,环氧树脂绝缘棒中设置一个长约 15 mm、直径为 10 mm 孔洞后再将表面封好来模拟绝缘子气隙缺陷,用数个约 $2\times 2\text{ mm}^2$ 和 $2\times 3\text{ mm}^2$ 的矩形薄铝片模拟微粒缺陷。试验过程中缓慢升高试验电压,仔细观察示波器中的信号及波形,超声波局放测试装置检测出如图 12 所示的放电灰度图。

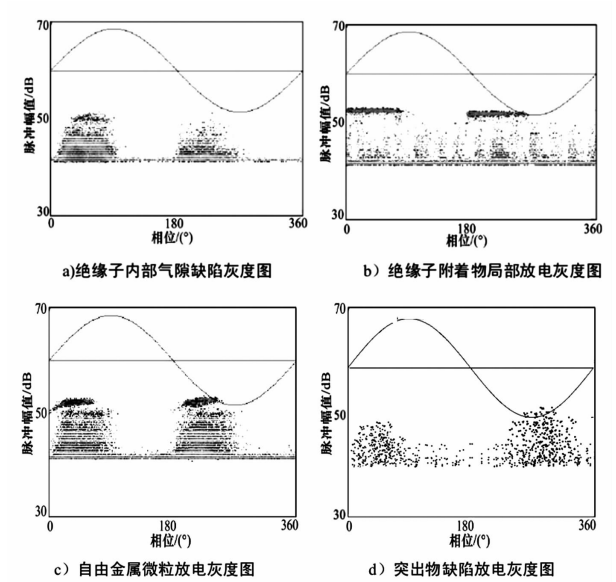


图 12 GIS 4 种缺陷下的局部放电示意图

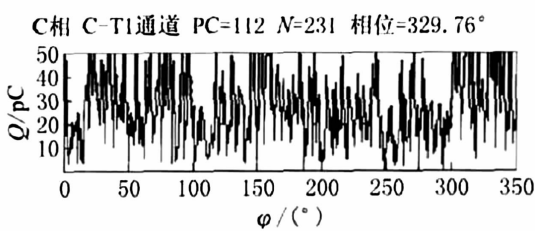
图 12 中 a) 绝缘子气隙缺陷在相位的正半周上和负半周都有放电现象,正半周较负半周的局部放电点总数多、相对脉冲幅值大。图 b) 绝缘子附着污染物缺陷局部放电产生的灰度图比较分散,电压较低时放电不明显,局部放电次数在相位上的分布范围较宽,放电特点并不明显。图 c) 自由金属微粒的局部放电灰度图相对较为集中,放电次数也更为集中,正半周与负半周均有放电现象,正半周的放电点与负半周基本均衡,负半周上放电幅值比绝缘子内部气泡缺陷幅值大一点。局部放电集中在 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $180^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 之间,表现为周期性的波动,具有良好的对称性。图 d) 金属突出物缺陷灰度图中,可以看出在工频正半周和负半周也都存在放电现象,在 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 放电量较少一些,但到 $240^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 时放电现象开始明显,而且放电幅值也变大了。

通过实验测试可知,超声波传感器与 GIS 之间无任何电气联系,不受电气干扰,通过时间间隔可以定位 PD。通过增大传感器增益和采用带通滤波器来减小外界不同频率特性振动因素的影响,在故障类型检测中对金属尖端、自由颗粒、悬浮电等缺陷具有较高灵敏性。

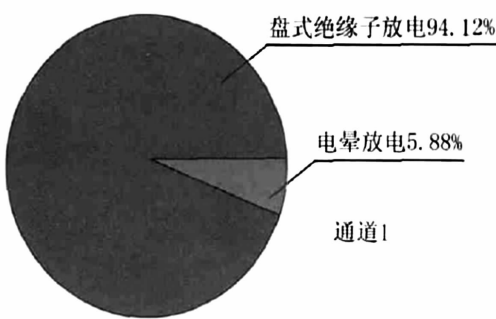
5 一起局部放电实例分析

2013 年 03 月 12 日 12:30,某特高压变电站 1 号主变压器 1 000 kV 侧 GIS 组合电器 C 相隔接组合气室与母线气室间盆式绝缘子闪络放电,1 号主变压器

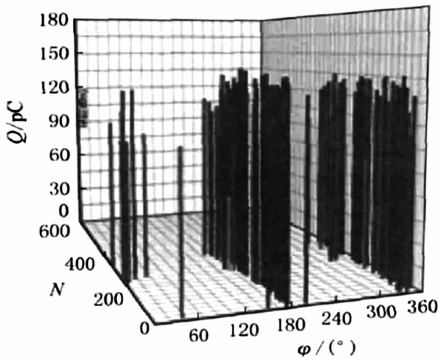
三侧开关跳闸后失电,造成华中地区部分电号,如图 13(a) 中 C 相 C-T1 通道放电量达到 112 pC,网波动。12:24 超声波在线检测系统发出告警信脉冲个



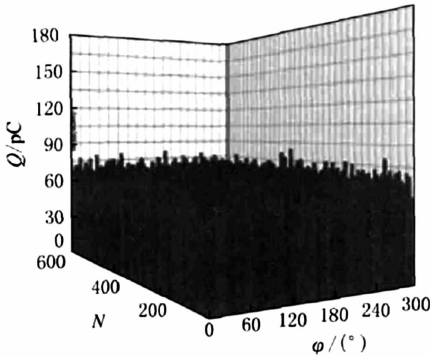
(a) 二维图 Q-φ



(b) 放电类型分析图



(c) 放电三维图 N-Q-φ



(d) 现场干扰三维图

图 13 超声波信号现场分析图

数 231, C - T1 通道即为安装在 C 相隔接组合气室与母线气室间盆式绝缘子的超声波探头,图 13(b)显示放电类型为盆式绝缘子放电。由于故障电流较大,1 号主变压器保护动作,GIS 设备停电,放电现象消失,所以只能对放电初期信号进行采集。

将故障间隔 GIS 转检修后解体检查,发现绝缘子内部出现长且深的裂纹,与超声波检测系统检测结果一致。

6 结 论

所设计的基于 TMS320 单片机的 1 000 kV GIS 超声波在线检测系统,采用空间时间差的方法进行局部放电故障定位,采用灵敏度高的超声波传感器和基于 AD620 的前置放大电路图,通过带通滤波器排除外界振动干扰,能够有效检测金属尖端、自由颗粒、悬浮电、盆式绝缘子故障等绝缘缺陷,但此检测法现场要在 GIS 外壳和盆式绝缘子上安装多个传感器。

参考文献

[1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京:水利电力

=====

(上接第 14 页)

参考文献

[1] 张瑞明,张新燕. 基于普通异步发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究[J]. 电网技术,2011(1):175 - 179.

[2] 闫存富,孔令云,路素青. 小型风力发电机常见故障分析[J]. 电源技术,2014(12):2451 - 2452.

[3] 雷亚洲. Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术,2005,25(12):27 - 32.

[4] 范高峰,赵海翔,王伟胜,等. 基于恒速风电机组的风电场并网过程仿真[J]. 电网技术,2007,31(14):20 - 23.

[5] 辜承林,陈乔夫,熊永前. 电机学第二版[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

[6] DlgSILENT Gmb H. Dynamic Modelling of Doubly - fed Induction Machine Wind Generators[R]. Technical RePort, Aug 2003.

[7] 李钢,慈建斌,李洪星,等. 基于 PSCAD/EMTDC 的风

出版社,1994.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.

[3] 周广,刘勇,金正波,等. 1 000 kV HGIS 在线特高频技术在局放监测的应用[J]. 华中电力,2011,24(5):57 - 62.

[4] Lundgaard, L. E , G. Tangen, B. Skyberg, et at. Acoustic Diagnosis of GIS;Field Experience and Development of Expert System[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2013,7(1):287 - 293.

[5] 罗勇芬,孟凡凤,李彦明. 局部放电超声波信号的检测及预处理[J]. 西安交通大学学报,2006,40(8):964 - 968.

[6] Hasegawa y, Izumi K, Kobayshi A, et al. Investigation on Phenomena Caused by Insulation Abnormalities in Actual GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994,9(2):796 - 804.

作者简介:

汤会增(1982),硕士研究生、工程师,从事电力设备在线检测技术研究和超特高压变电运维管理工作。

(收稿日期:2015 - 11 - 19)

光互补并网发电系统建模与仿真[J]. 电源技术,2014(10):1893 - 1897.

[8] 院海,晁勤,吐尔逊. 基于 PSCAD 的并网型风机建模及仿真[J]. 可再生能源,2008,26(2):15 - 18.

[9] Trudnowski D J, Gentile A, Khan J M, et al. Fixed Speed Wind Generator and Wind Park Modeling for Transient Stability Studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004,19(4):1911 - 1917.

[10] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 大型风电场建模及接入甘肃嘉酒电网仿真分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):96 - 101.

[11] 韩肖清,胡月星,张伟,等. 基于 MATLAB 的并网风电场动态仿真[J]. 太阳能学报,2008(2):175 - 179.

作者简介:

赛尔山伙加·居曼(1989),硕士,主要研究风发电及并网技术;

张新燕(1964),博士研究生、教授、硕士生导师,主要从事风力发电技术、风机并网故障分析、故障诊断等方面的研究工作。

(收稿日期:2015 - 11 - 12)

500 kV HGIS 变电站防雷保护配置研究

傅文韬

(国网湖南省电力公司汨罗市供电分公司,湖南 汨罗 414400)

摘 要:500 kV HGIS 变电站在结构上和 GIS 变电站不同,站内电气设备的雷击过电压水平也会不同。因此,需要对 500 kV HGIS 变电站进行雷电侵入波过电压研究,以确保在雷电波侵入时,站内电气设备上的电压水平不超过其绝缘水平。以某 500 kV HGIS 变电站为例,考虑了多种运行方式、线路高抗、线路电晕等影响因素,采用国际上通用的仿真计算程序 EMTP,建立了该变电站的雷击过电压仿真模型;并对不同运行方式下,该变电站雷电侵入波过电压水平进行了分析计算。根据仿真结果,提出了可能的雷击过电压保护方案,具有实际工程参考价值。

关键词:HGIS 变电站;防雷保护;EMTP;避雷器

Abstract:The HGIS substation and GIS substation of 500 kV level are different in structure, and the lightning over-voltage level of their electrical apparatus is also different. So it is necessary to study the lightning over-voltage in 500 kV HGIS substation in order to ensure that the electrical apparatus will keep the voltage level in normal range under any operating modes during the lightning wave intrusion. Taking a 500 kV HGIS substation for example and taking the various influencing factors into account, including operating modes, line reactor and line corona, the simulation model of lightning over-voltage of the substation is established using electromagnetic transient program (EMTP) as simulation tool, and the lightning over-voltage level of the substation is analyzed and calculated in various operating modes. Based on simulation results, a possible protection scheme against lightning over-voltage is proposed, which has a reference value for practical engineering.

Key words:HGIS substation; protection against lightning; EMTP; lightning arrester

中图分类号:TM86 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)02-0029-05

0 引 言

雷电过电压是影响超高压输电网络正常运行的重要因素之一。一旦发生雷害事故,将直接影响系统的安全可靠运行,造成严重的后果^[1]。目前,500 kV 电压等级的变电站有 3 种类型:500 kV GIS、500 kV AIS、500 kV HGIS。变电站设备的雷电过电压情况与变电站结构紧密相关,不同类型的变电站,防雷保护配置情况也不一样。

对于 500 kV GIS 变电站:1)GIS 套管的波阻抗远小于架空线的波阻抗;2)雷电流从架空线进入 GIS 反射波的极性与入射波极性相反;3)GIS 变电站各设备的电气距离较短,有利于整个变电站的防雷保护。对于 500 kV GIS 变电站防雷保护配置,往往采用在线路靠 CVT 侧和主变压器侧各安装 1 组避雷器以及母线和高压电抗器回路不安装避雷器的配置方案^[2-3]。AIS 变电站,各设备相距较远,往往

采用在高压电抗器、线路侧 CVT、母线以及主变压器侧各安装 1 组避雷器^[4-5]。

HGIS 变电站的结构与 GIS 变电站基本相同,但 HGIS 变电站母线为裸露的,可达几百米长。当雷电波从含高压电抗器的线路侵入时,变电站各设备的雷电过电压会不同,尤其会对进线端设备产生很大的过电压威胁。一方面,母线的波阻抗与线路的波阻抗相差不大,雷电流从架空线进入母线后的反射波可忽略不计;另一方面,裸露的母线加大了高压电抗器和 GIS 套管的距离,计算时采用的雷电流的波头为 2.6 μs,当高压电抗器上的雷电过电压达到峰值时,从 GIS 入口处返回的反射波还没到达高压电抗器,这与 GIS 变电站的情况不同;因此,需要对 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波在变电站电气设备上所产生的过电压进行仿真计算,找出过电压的分布变化规律,对限制雷电过电压、保护电气设备可提供有价值的参考依据,以进一步优化变电站的工程设计。

以某 500 kV HGIS 变电站为例,采用国际通用

的 EMTP 电磁暂态仿真计算程序,研究了不同运行方式下以及不同雷击点下雷电过电压保护方案,根据过电压与绝缘水平要求,制定了该变电站防雷保护配置方案。

1 计算模型及参数

1.1 雷电流

雷电放电过程分为先导过程和主放电过程。研究表明,先导通道具有分布参数的特征,可近似为一个具有电感、电容均匀分布参数的导电通道,波阻抗为 Z_0 。其过程可以简化为 1 个数学模型,将其考虑为 1 个电流源,彼德逊等值电路如图 1 所示。

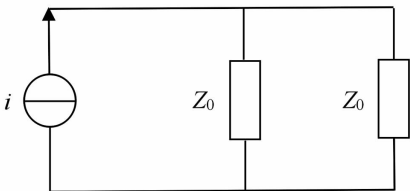


图 1 雷电流源等值电路

本次计算选取概率为 0.35% 的雷电流,其幅值为 216 kA,雷电流的波形选择为 2.6/50 μ s。反击时,雷电通道的波阻抗 Z_0 取 300 Ω ^[6]。

1.2 绝缘子串闪络模型

绝缘子串的闪络由绝缘子串的伏秒特性曲线和电压曲线确定。如图 2 所示,绝缘子串的伏秒特性曲线和电压曲线的相交时刻 t_2 为闪络时刻,相交点电压 U_2 为闪络电压。

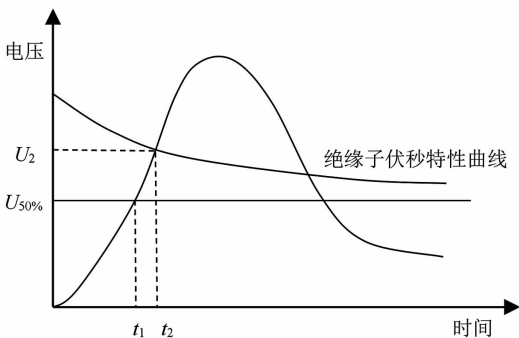


图 2 绝缘子串的闪络原理

对于 500 kV 输电线路,导线上绝缘子串处工频电压不可忽略。雷击杆塔塔顶时,其绝缘子串的工频电压瞬时值不确定,考虑绝缘子串最易闪络的情况,即雷击发生时,导线上绝缘子串处的工频电压达到幅值,且极性与塔顶电位的极性相反。本次计算中,工频电压取输电线路的相电压峰值 429 kV^[2]。

采用 EMTP 程序中的 TACS(数值仿真)功能,

考虑绝缘子串冲击伏秒特性,并准确计算作用在绝缘子串上的过电压,模拟绝缘子串闪络过程。

1.3 输电线计算模型

变电站的雷电侵入波分为绕击和反击。这里考虑雷电过电压情况更严重的反击波侵入方式^[4]。

该 500 kV HGIS 变电站的进线段采用双避雷线,同杆单回五导线输电系统。仿真中,采用 ATP 中 LCC 架空线路模块仿真输电线路,并选择 JMARTI 模型。实测结果表明,JMARTI 模型的计算结果与实际的结果较接近^[3]。

站内导线视为无畸变线,波阻抗为常数且不计电晕影响。站内导线的波阻抗由式(1)决定。

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{h_a}{r_e} \right) \tag{1}$$

式中: r_e 为导体半径; h_a 为导体平均高度。

对于 SF₆ GIS 管线,忽略导体电阻的焦耳损耗,视其为理想的无损传输线。

GIS 管道中导体的波阻抗为

$$Z_{GIS} = 60 \ln \left(\frac{R}{r} \right) \tag{2}$$

式中: R 为管道半径; r 为导体半径; R/r 通常大于或等于 e ,故 GIS 管线波阻抗在 60 Ω ~ 75 Ω 之间。本次计算,GIS 管线波阻抗取 65 Ω 。

1.4 电晕模型

线路上产生的电晕是雷电波衰减和畸变的主要因素。在研究变电站雷电过电压时,应将进线段电晕考虑进去。用动态电容去模拟电晕引起的衰减和变形,基于线路的伏秒特性,用 TACS 组合模型模拟电晕,如图 3 所示。

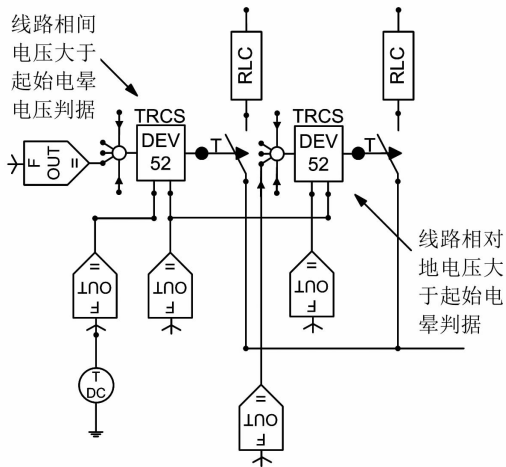


图 3 电晕模型

图 3 中 2 个 DEVICES 装置,分别为线路相对地、相与相之间发生起始电晕的判据。

表 1 氧化锌避雷器的电气特性

避雷器类型	额定电压/kV	直流 1 mA 参考电压/kA	8/20 μs 雷电冲击残压/kV	
			10 kA	20 kA
Y20W5 - 420/1046	420	565	974	1 046
Y20W5 - 444/1106	444	597	1 015	1 106

1.5 避雷器模型

500 kV 输电系统中,已大量采用氧化锌避雷器,这次研究的变电站采用两种 500 kV 金属氧化锌避雷器,分别为变电站型和线路型避雷器。

研究中,避雷器采用 IEEE Std C62. 22 - 2009 推荐的计算模型,在 EMTP 程序中用分段指数化的方法来模拟避雷器的伏安特性^[7],其电气特性见表 1。

1.6 杆塔模型

从塔顶侵入杆塔的雷电流将在杆塔、避雷线、绝缘子串及导线、大地组成的系统中发生复杂的波过程。雷电波沿杆塔传播时,不同位置杆塔的波阻抗是不同的。近几年,国外一些专家使用多波阻抗来模拟输电线路的杆塔,建立了杆塔的多波阻抗计算模型,其具体的等值电路如图 4 所示。

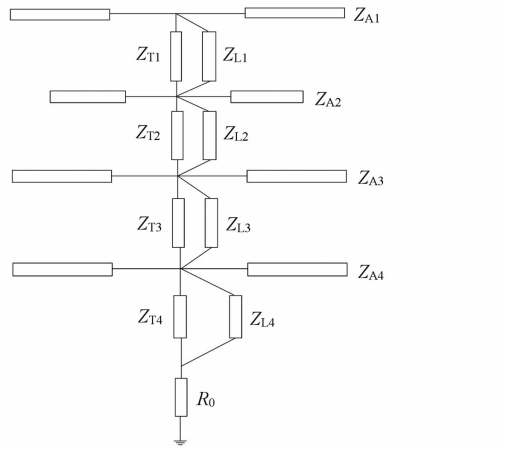


图 4 杆塔的等值多波阻抗等值电路

主架每部分阻抗 Z_{Tk} 为

$$Z_{Tk} = 60 (\ln \frac{2^{3/2} h_k}{r_{ek}} - 2) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中, $r_{ek} = 2^{1/8} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4}$ 。

支架每部分的波阻抗 Z_{Lk} 为

$$Z_{Lk} = Z_{Tk} / 9 \quad (4)$$

杆塔横担波阻抗 Z_{Ak} 为

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2h_k}{R_{Ak}} \quad (5)$$

1.7 变电站设备模型

站内设备如变压器、隔离开关、断路器、互感器等,在雷电波作用下,均可等值为冲击入口电容,它

们之间由分布参数线段相隔^[5]。站内各设备的等值冲击入口电容值,如表 2 所示。

表 2 变电站电气设备过电压计算等值参数

名 称	参 数
SF ₆ GIS 管线	$Z = 65 \, \Omega \quad V = 300 \, \text{m}/\mu\text{s}$
架空线	$Z = 280 \, \Omega \quad V = 210 \, \text{m}/\mu\text{s}$
变压器 (TR)/pF	5 000
电容式电压互感器 (CVT)/pF	5 000
高压电抗器 (REA)/pF	5 000
电流互感器 (TA)/pF	700
断路器 (CB)/pF	300
GIS 套管/pF	200
隔离开关 (DS)/pF	80

2 运行方式

2.1 运行方式的选择

某 500 kV HGIS 变电站一次接线图,如图 5 所示。

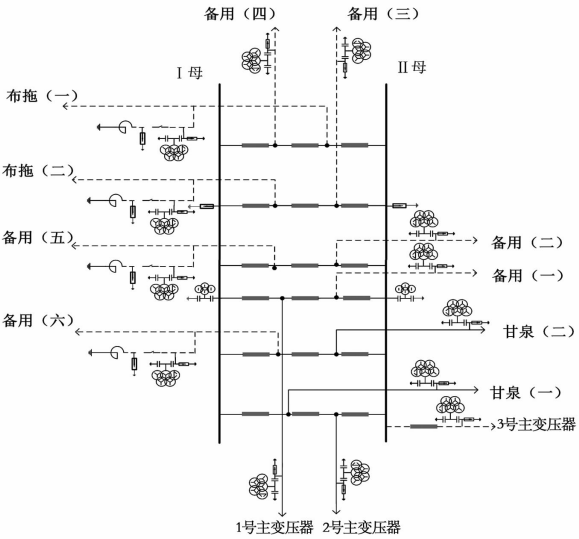


图 5 500 kV HGIS 变电站一次接线图

变电站不同的运行方式对设备雷电过电压水平影响较大。研究发现,网络拓扑结构较简单的运行方式的雷电过电压比拓扑结构更复杂的运行方式更为严重^[6]。一般认为,一线一变运行方式下,设备的过电压最为严重。

根据一线一变、一线两变、两线一变 3 种运行情

表 3 各设备的雷电过电压值

配置	运行情况	线路侧 CVT/kV	主变压器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	一线一变	1 087.5	1156.5	1 298	1 248	16.5
	一线两变	1 005	1 130	1 130.3	1 142.7	13.28
	两线一变	1 012	1 065	1 046	1 089	10.9
	最大值	1 087.5	1 156.5	1 298	1 248	16.5
配置 2	一线一变	1 620	1 131	1 118	1 452.7	13.5
	一线两变	1 567.2	1 142	1 166.1	1 298.8	15.4
	两线一变	1 130	959.9	1 002	1 017.5	6.88
	最大值	1 620	1 142	1 166.1	1 452.7	15.4
配置 3	一线一变	2 122.4	1 197.5	1 689.1	1 793.3	19.9
	一线两变	1 521.9	1 171.5	1 428	1 378.8	16.9
	两线一变	1 568.9	1 102	1 277.6	1 268.7	10.9
	最大值	2 122.4	1 197.5	1 689.1	1 793.3	19.9

况,选取了 16 种运行方式进行详细分析。另外,单独分析并联高压电抗器的防雷保护。以布拖(一)线路为雷击点为例,一线一变运行方式下的计算等值电路如图 6 所示。

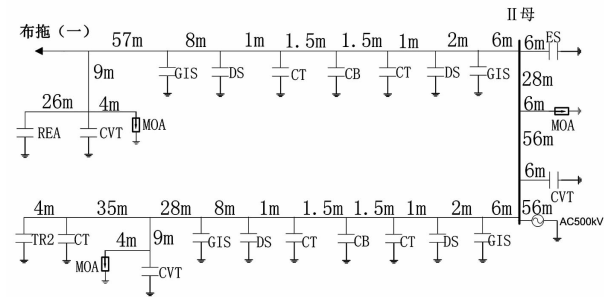


图 6 布拖(一)进波的等值电路图

2.2 避雷器的安装位置

线路侧避雷器的安装点为距离线路侧 CVT 4 m,距离高压电抗器 30 m。高压电抗器避雷器的安装位置为距离高压电抗器 4m,距离线路侧 CVT 30 m。母线侧避雷器的安装位置为布拖(二)间隔两端的母线处,距离母线上端 66 m。根据工程要求,各主变压器侧均安装避雷器,安装位置为距离主变压器 30 m,如图 6 所示。

3 仿真分析

在分析研究和计算过程中,重点考虑了以下 3 个方面:1)不同运行方式的影响;2)高压电抗器对线路侧 CVT、母线的防雷保护的影响;3)500 kV HGIS 变电站防雷保护配置方案分析。

3.1 线路侧 CVT、母线的防雷保护的影响分析

根据上述各元件模型,搭建了各种运行方式的仿真模型。针对母线和线路侧防雷保护配置分析

(不含高压电抗器线路),考虑以下 3 种保护配置方案:

- 1)线路侧加装避雷器,母线不加避雷器;
- 2)母线加装避雷器,线路侧不装避雷器;
- 3)母线和线路侧都不加避雷器。

根据某 500 kV HGIS 变电站实际参数,用 EMTP 软件进行建模仿真。本次研究变电站各相邻节点的最短电气距离为 1 m,波速为光速,因此步长取 0.001 μs 即可,仿真计算时间为 50 μs。雷击点为进线段的 2 号~6 号杆塔塔顶^[6],雷电过电压检测点为线路侧 CVT、高压电抗器、GIS 套管以及母线。由于母线长度达到了 150 m,所以母线上过电压检测点有 3 个,分别为雷电进波处以及母线两端处。3 种配置下,各设备的雷电过电压仿真结果如表 3 所示。

取站内除变压器以外设备的雷电冲击耐受电压为 1 550 kV,设备绝缘裕度参考 IEC71-2 标准,内绝缘裕度取 1.15,则各设备允许的最大过电压为 1 348 kV。当采用配置 1 时,最大过电压出现在母线侧为 1 298 kV,低于 1 348 kV。避雷器的最大放电电流为 14.5 kA,小于避雷器的标称电流 20 kA。可见,在线路加装避雷器,母线不加装避雷器的情况下可以满足绝缘裕度要求。采用配置 2 时,线路侧电压互感器和 GIS 套管处出现的最大过电压超过允许值,不能满足绝缘要求。同样,配置 3 也不能满足绝缘要求。

综合上述分析,对于不含高压电抗器的线路,只需在进线侧加装 1 组避雷器就能满足防雷保护的要求。

3.2 进线段含高压电抗器的防雷保护分析

考虑以下 3 种保护配置方案:

表 4 各设备的雷电过电压值最大值

配置	线路侧 CVT/kV	高压电抗器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	1 142.1	1 573.1	1 384.6	1 334.5	14.2
配置 2	1 532.7	1 689	1 304.3	1 286	15.3
配置 3	1 603	1 264	1 368.4	1 398.1	19.5

表 5 3 种配置下各设备的雷电过电压值

配置	线路侧 CVT/kV	高压电抗器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	1 152	1 646	1 116	1 136	14.1
配置 2	1 335	1 084	1 082	1 142	12.3
配置 3	1 094	1 163	1 067	1 120	9.2

1)线路侧 CVT 加装避雷器,高压电抗器和母线不加装避雷器;

2)线路侧 CVT 和母线不加装避雷器,高压电抗器回路加装避雷器;

3)线路侧 CVT 和高压电抗器不加避雷器,母线加装避雷器。

由表 4 可得,配置 1 到配置 3 都存在设备过电压超标的情况,都不满足绝缘要求。因此,可得以下 3 个结论:1)进线端的避雷器不管是安装在高压电抗器回路还是 CVT 处,都不能有效保护进线端设备;2)线路侧安装的避雷器不能保护母线及母线上设备;3)母线上避雷器距离线路侧 CVT 和高压电抗器都比较远。

可见,高压电抗器加大了进线端设备的雷电过电压水平,与前面分析一致。

3.3 500 kV HGIS 变电站防雷保护配置选择

由表 2 可得,单独的避雷器配置方案不能满足变电站的防雷要求,所以考虑母线与进线端设备相互配合加装避雷器的方案,考虑以下 3 种配置:

1)线路侧 CVT 加装避雷器,母线加装避雷器,高压电抗器不加装避雷器;

2)高压电抗器加装避雷器,母线加装避雷器,线路侧 CVT 不加装避雷器;

3)高压电抗器、线路侧 CVT、母线都加装避雷器。

以 4 种运行方式为例,3 种配置下各设备的最大过电压值仿真结果如表 5 所示。

由表 5 可得,配置 1 方式下高压电抗器的过电压达到了 1 646 kV,不满足设备的绝缘要求;在配置 2 和配置 3 下,各设备的最大雷电过电压分别为 1 329 kV 和 1 158 kV,满足该变电站设备绝缘要求。但配置 2 比配置 3 少装一组避雷器,更经济;因此,从变电站防雷的可靠性和经济性出发,高压电抗器和母线侧安装避雷器的配置方案,能有效地满足该 500 kV HGIS 变电站的防雷要求。

4 结 论

以某 500 kV HGIS 变电站为对象,所选 16 种情况均为网络拓扑结构较简单的运行方式,其造成的雷击过电压的影响通常比拓扑结构复杂的其他运行方式更为严重,此外,考虑了线路电晕和工频电压的影响,根据该变电站实际结构参数搭建仿真模型,更有实际意义。

根据仿真分析,提出了该 500 kV HGIS 变电站的防雷保护配置方案,并得出以下结论:

1)进线段不含高压电抗器回路时,只需要在线路侧安装 1 组避雷器,母线不需要安装避雷器;

2)进线段含高压电抗器回路时,高抗回路和母线需安装避雷器;

3)线路高压电抗器加大了进线端设备的雷电过电压水平。

参考文献

[1] 李飞,周力行,黄辉先. 500 kV 变电站并联电抗器雷电侵入波仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2008(4):36-38.

[2] 谢辉春,文习山,邓维,等. 500 kV GIS 变电站雷击进线段塔顶雷电过电压的仿真研究[J]. 电气应用, 2006, 25(3):63-66.

[3] 吕健双. 500 kV GIS 变电站雷电过电压研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.

[4] 李洪涛. 500 kV 变电站雷电侵入波保护研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.

[5] 张玉秋,王子春,杨利军. 500 kV 变电所防雷保护计算分析[J]. 中国电力, 1995(8):12-16.

[6] 袁兆祥,周洪伟. 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波的计算分析[J]. 高电压技术,2007, 33(6):71-75.

[7] 吴伯华,陈继东. 500 kV 线路型避雷器雷电过电压的保护性能[J]. 高电压技术, 2002, 28(6):23-26.

(收稿日期:2015-11-24)

变压器绝缘油中 氦气组分的确认及浓度的测试

胡仕红¹, 鲁登峰²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610072)

摘要:目前由于变压器安装的在线色谱仪需要用氦气等气体作为载气,在线色谱仪工作时,一部分氦气会溶解于绝缘油中。当采用气相色谱法测定绝缘油中溶解的甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、氢气等故障气体时,氦气与氢气的保留时间非常接近,易将氦气误认为氢气,导致测试结果错误,给生产带来不必要的麻烦。由于基层单位对氦气浓度的测试工作尚未开展,现对变压器绝缘油中氦气的确认及其浓度的测试方法进行阐述。

关键词:在线色谱仪;气相色谱法;氢气;氦气;保留时间

Abstract:At present, because transformer is installed with on-line chromatograph which takes helium or other gases as carrier gas, so when on-line chromatograph is working, a part of helium is dissolved in the insulating oil. When gas chromatographic method is adopted to determine the dissolved methane, ethylene, ethane, acetylene, hydrogen and other gases in insulating oil, the retention time of helium and hydrogen is very close to each other, so it often takes helium to be hydrogen, which leads to a wrong test result. As the basic-level unit has not carried out the test of helium concentration, the determination on helium in transformer insulating oil will be described as well as the method for testing the concentration of helium.

Key words:on-line chromatograph; gas chromatography; hydrogen; helium; retention time

中图分类号:TM855 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2016)02-0034-03

0 引言

利用气相色谱法测试绝缘油中溶解的甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、氢气、一氧化碳、二氧化碳、氧气、氮气等 9 种气体的组分及浓度在中国已有多年的经验,是充油电气设备出厂检验和运行过程中监督判断设备潜伏性故障的重要手段。气相色谱法测定绝缘油中溶解气体组分时,利用保留时间对各组分进行定性;但近年来由于变压器安装的在线色谱仪需要用氦气等气体作为载气,当在线色谱仪工作时,一部分氦气会溶解于绝缘油中。当采用气相色谱法测定绝缘油中溶解的甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、氢气等故障气体时,氦气与氢气的保留时间非常接近(氢气的保留时间仅比氦气的保留时间提前约 0.05 min),易将氦气误认为氢气,导致测试结果错误,给生产带来不必要的麻烦。目前各单位均采用一次溶解平衡法测试甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、氢气等故障气体的浓度,但由于氦气

在绝缘油中的溶解系数未知,需采用二次溶解平衡法测试其浓度。当前各基层单位对绝缘油中氦气组分的确认及浓度的测试工作尚未开展。在此,将对变压器绝缘油中氦气的确认及其浓度的测试方法进行阐述,以进一步规范和提高油务人员的测试水平,更加有效地保证设备的安全运行。

1 绝缘油中氦气的确认

如果变压器安装了在线色谱仪,而在线色谱仪又使用了氦气作为载气。当采用气相色谱法测定绝缘油中溶解的甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、氢气、一氧化碳、二氧化碳、氧气、氮气等 9 种气体时,人工对色谱峰进行确认时,发现样品气中某组分峰的保留时间比标准气中氢气峰的保留时间提前约 0.05 min,而样品气中其他组分峰的保留时间与标准气中其他组分峰的保留时间基本一致时,便可以确定该绝缘油油中含有氦气。

2 测试氦气、氢气 的保留时间和分离度

对油中溶解气体的气相色谱分析法, GB/T 17623 – 1998 和 GB/T 7252 – 2001 都是采用的外标法,即用组成和浓度都已知的标准气体通过检测器后所产生峰的个数、峰的保留时间、峰的形状、峰的高度等作为参照物,将样品气体通过检测器后所产生峰的情况进行比对,对保留时间和峰形一致的认为是同一种物质。这就要求固定相与操作条件严格不变;然而在很多情况下操作条件难以绝对恒定,会导致绝对保留时间会有一些变化,同时样品的组分往往比标准气体的组分要复杂一些,在分析时往往会有重叠峰出现,系统自动识别时会将峰识别错误,因此需要人工进行识别。

当人工进行识别时,首先查看各组分峰是否完全识别,其次根据保留时间和峰形核实各组分峰是否识别正确。核实时,应将样品各组分峰的保留时间与标准气体各组分峰的保留时间进行对比;如同时增大或同时减小即变化趋势一致,同时峰形一致可以认为是同一物质。当峰形不明显怀疑有重叠峰时,应将所怀疑的峰放大进行确认。

下面以河南中分的色谱仪(2000B)为例进行说明:该系统以绝对保留时间对组分进行定性。

2012 年 12 月 7 日,在试验室内,采用与某换流站及比对电业局相同的气相色谱仪,设置相同的仪器工作条件,配制了只含有氦气的气体样品,只含有氢气的气体样品,同时含有氢气、氦气的样品,测试氦气、氢气的保留时间和分离度。测试结果如表 1。测试谱图见图 1、图 2、图 3。

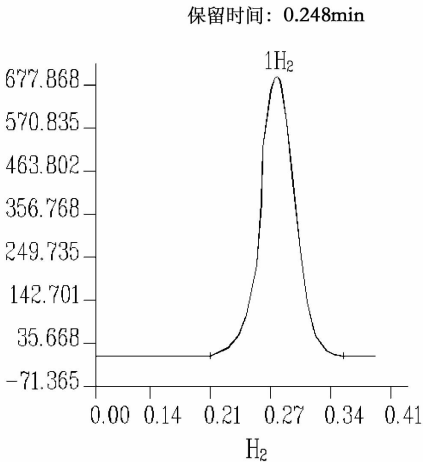


图 1 氦气谱图

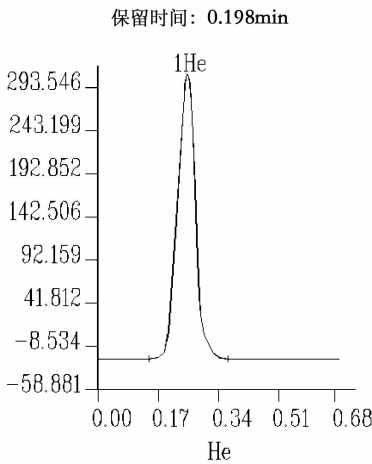


图 2 氦气谱图

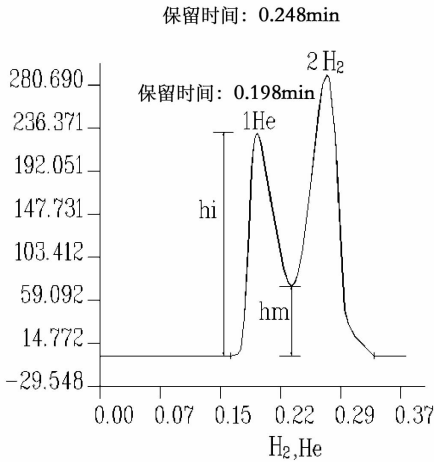


图 3 氢气、氦气混合气体谱图

表 1 氢气和氦气保留时间及分离度试验结果

氦气和保留时间 /min	氢气保留时间 /min	分离度 θ
0. 198	0. 248	0. 57
$\theta = \frac{h_i - h_m}{h_i}$ $= \frac{186. 206 - 80. 733}{186. 206}$ $= 0. 57$		

结论:氢气与氦气的保留时间相差约 0. 05 min,分离度大于 0. 5,满足气相色谱法定性和定量检测要求。

3 油中氦气浓度的测试

核对换流站及比对电业局实验室检测时标准气体和样品气体色谱图,发现样品气体氢气保留时间比标准气体氢气保留时间提前约 0. 05 min。

2012 年 12 月 18 日,用换流站现场实验室气相色谱仪,对该变压器油中溶解气体含量进行检测。

表 2 标准气体检测结果

标准气体浓度 L/L	取气体积/mL	峰高/mV		保留时间/min	
		测试值	平均值	测试值	平均值
1/50	1	147.922	148.140	0.248	0.247
		148.359		0.246	

表 3 第 1 次脱气的检测结果 (室温:19.5℃、大气压:96.1 kPa)

样品	脱气体积/mL	峰高/mV		保留时间/min		平衡后气体与油样的 体积比 V'_g/V'_L	平衡后氦气在 气体中的浓度/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$
		测试值	平均值	测试值	平均值		
A	3.2	21.859	21.048	0.244	0.244	0.086	2 841.64
		21.836		0.244			
B	3.4	21.017	21.206	0.245	0.247	0.091	2 862.97
		21.395		0.249			

表 4 第 2 次脱气的检测结果 (室温:19.5℃、大气压:96.1 kPa)

样品	脱气体积/mL	峰高/mV		保留时间/min		平衡后气体与油样的 体积比 V'_g/V'_L	平衡后氦气在 气体中的浓度/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$
		测试值	平均值	测试值	平均值		
A	9.1	1.818	1.850	0.247	0.245	249.76	
		1.882		0.247			
B	9.2	1.784	1.804	0.245	0.246	0.248	243.55
		1.828		0.247			

1)检测标准气体

用色谱试验时使用的载气氩气做底气,配制浓度为 1/50 L/L 的标准气体,并取 1 mL 进行分析,试验结果如表 2。

2)绝缘油第 1 次脱气

用 100 mL 注射器吸取试验油 40 mL A、B 两个油样,并分别往 A、B 两个油样中加入 10 mL 氩气,在 50℃ 下振荡 20 min,静置 10 min,取出全部平衡气体,在室温下准确读取气体体积并取 1 mL 进行分析,结果如表 3。

根据表 3,将样品 A 在室温、试验压力下平衡的气样体积 V_g 和试验油体积 V_L 分别校正为 50℃、试验压力下的体积。

$$V'_g = V_g \times \frac{323}{273 + t} = 3.2 \times \frac{323}{273 + 19.5} = 3.53 \tag{1}$$
$$V'_L = V_L [1 + 0.000\ 8 \times (50 - t)]$$
$$= 40 \times [1 + 0.000\ 8 \times (50 - 19.5)]$$
$$= 40.98 \tag{2}$$

第 1 次平衡后样品 A 气体与油样的体积比为

$$r_1 = \frac{V'_g}{V'_L} = \frac{3.53}{40.98} = 0.086 \tag{3}$$

式中: V'_g 为 50℃、试验压力下平衡气体体积,mL; V'_L 为 50℃ 时的油样体积,mL; V_g 为室温 t 、试验压力下平衡气体体积,mL; V_L 为室温 t 时所取油样体积,mL; t 为试验时的室温,℃;0.000 8 为油的热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; r_1 为第 1 次平衡后样品 A 气体与油

样的体积比(即 V_g/V'_L)。

第 1 次平衡后,样品 A 溶解气体氦气在气体中的浓度为

$$C_{ig} = \frac{C_{is}}{h_{is}} \times h_{ig} = \frac{1/50}{148.140} \times 21.048 \times 10^6 = 2\ 841.64 \tag{4}$$

式中: C_{ig} 为样品气中 i 组分浓度, $\mu\text{L/L}$; C_{is} 为标准气体中 i 组分浓度, $\mu\text{L/L}$; h_{is} 为标准气体中 i 组分的平均峰高,mV; h_{ig} 为样品气中 i 组分的平均峰高,mV。

同理,根据式(1)~式(4)可算出:

第 1 次平衡后样品 B 气体与油样的体积比为 0.091;第 1 次平衡后,样品 B 溶解气体氦气在气体中的浓度为 2 862.97 $\mu\text{L/L}$ 。

3)向盛有第 1 次平衡后油样的注射器内加入 10 mL 氩气,在 50℃ 下振荡 20 min,静置 10 min,取出全部平衡气体,在室温下准确读取气体体积并取 1 mL 分析,结果如表 4。

根据式(1)~式(4)可算出:

第 2 次平衡后样品 A 气体与油样的体积比为 0.245;第 2 次平衡后,样品 A 溶解气体氦气在气体中的浓度为 249.76 $\mu\text{L/L}$;第 2 次平衡后样品 B 气体与油样的体积比为 0.248;第 2 次平衡后,样品 B 溶解气体氦气在气体中的浓度为 243.55 $\mu\text{L/L}$ 。

4)油中溶解的氦气含量根据分配定律和物料

(下转第 44 页)

基于改进 BP 神经网络的接地故障定位研究

朱雁斌

(云南电网有限责任公司昆明供电局,云南 昆明 650011)

摘 要:考虑到经典的小波包频带能力特征提取方法不将频率时变特性进行考虑而统计全部的频带,而且经典的小波能量谱算法没有将每个分解频带的能量随着时间轴分布特性进行充分考虑,提出使用卷积小波包能量矩对单相接地故障信息的特征向量进行提取,从而为单相接地故障定位的判断提供依据。使用 BP 神经网络建立配电网单相接地故障的定位算法;由于常规 BP 神经网络容易陷入局部最小值,并且有算法收敛慢、训练时间长等问题,提出使用遗传算法对 BP 神经网络进行优化,同时为提高遗传算法优化效率,使用混合编码方式对遗传算法进行改进。最后通过实验验证所提出的改进型 BP 神经网络的接地故障定位算法的性能,结果表明,故障定位的精度有了较大的改善,验证了所提出方法的可行性。

关键词:接地故障;BP 神经网络;改进遗传算法;故障定位

Abstract:The frequency band feature extraction method of classical wavelet packet does not consider the frequency time varying characteristics, and the classical wavelet energy spectrum algorithm also does not consider that the features of every decomposed frequency band energy are distributed along with time. The feature vector of single – phase earth fault information is extracted by convolution type of wavelet packet energy moment, which provides a reference for the determination of single – phase earth fault location. BP neural network is used to establish the location algorithm of single – phase earth fault. Because the conventional BP neural network is easy to fall into local minimum, and the algorithm is slow and the training time is long, the genetic algorithm is used to optimize BP neural network, and the hybrid encoding is used to improve the efficiency of genetic algorithm. Finally, the performance of the improved BP neural network is verified by the experiments. The results show that the accuracy of fault location is greatly improved and the feasibility of the proposed method is verified.

Key words:ground fault; BP neural network; improved genetic algorithm; fault location

中图分类号:TM855 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0037 – 04

0 引 言

近年来电力部门针对配电系统故障进行数据统计,发现其中 60% 以上的配电系统故障属于单相接地引起的。因此,对于电力部门来说,快速定位故障线路位置及时解决单相接地引起的配电系统故障是目前急需研究解决的主要问题之一,也是相关科学工作者研究的热点问题之一^[1-4]。

文献[5]中使用卷积型小波包能量矩对接地故障时暂态电流信号提取特征向量,使用免疫粒子群优化对神经网络进行优化并建立精确快速识别接地故障的识别定位模型。文献[6-8]中对小电流接地系统中的单相接地故障特征进行了详细分析,故障时暂态信息量特征信息使用小波分析进行处理,

最后使用小波神经网络建立故障特征分量和故障点位置的映射非线性关系,从而进行接地故障的识别定位。文献[9]中使用小波函数对常规 BP 神经网络的隐含层激励函数进行改造,使用接地故障时的暂态电流信号的有功、无功功率以及小波能量作为神经网络的输入向量,使用动量项提高 BP 神经网络的训练速度。文献[10]中使用本征模函数能量矩的方法对接地故障时的暂态电流信号进行特征提取,之后使用三层小波神经网络建立故障定位识别模型。

低压配电网中最为容易出现的接地故障应属小电流接地,即常说的中性点非有效接电,由于配电网出现分支非常多,小电流接地时的电流非常微弱,这就对小电流接地的故障定位带了非常大的难度。针对这一难题,使用卷积小波包能量矩对发生单相接

地故障时的稳态和暂态特征进行提取,再使用 BP 神经网络建立接地故障定位模型。

1 单相接地故障特征提取

故障暂态分量包含丰富的单相接地故障信息,能够将单相接地故障时的特征表示得更清晰,并且不易被故障前的负荷所干扰,因此使用故障暂态分量作为单相接地故障定位的判断依据是十分有意义的。由于经典的小波包频带能力特征提取方法不将频率时变特性进行考虑而统计全部的频带,而且经典的小波能量谱算法没有将每个分解频带的能量随着时间轴分布特性进行充分考虑,因此使用卷积小波包能量矩对单相接地故障信息的特征向量进行提取,从而为单相接地故障定位的判断提供依据。

设定 $S(t)$ 为表示时刻信号密度的信号函数; $L^2(R)$ 为由所有平方可积的函数所构成的向量空间;如果 μ_n 是正交尺度函数得到的小波包, $\{2^{-\omega/2}\mu_n(2^{-\omega}\cdot t-q),q\in Z\}$ 是小波包的子空间的规范正交基,则信号函数 $S(t)$ 的卷积型小波包变换方法如下:

$$S_p^{n,\omega}=\int_R\frac{S(t)}{2^\omega}\mu_n(\frac{p-t}{2^\omega})dt$$

$$0<\omega<H,0\leq n\leq 2^H\tag{1}$$

式中: ω 是分解的尺度; H 是分解尺度的最大值; n 是频带号; p 是位置参量。

卷积型的小波包变换快速分解方法表述为

$$\begin{cases} S_p^{2n,\omega+1}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{q\in Z}h(q)S_{p-2\omega q}^{n,\omega} \\ S_p^{2n+1,\omega+1}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{q\in Z}g(q)S_{p-2\omega q}^{n,\omega} \end{cases}\tag{2}$$

卷积型的小波包变换重构算法表述为

$$S_p^{n,\omega}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{q\in Z}\bar{h}(q)S_{p+2\omega q}^{2n,\omega+1}+\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{q\in Z}\bar{g}(q)S_{p+2\omega q}^{2n+1,\omega+1}\tag{3}$$

式中: $h(q)$ 和 $g(q)$ 是滤波器的系数; $\bar{h}(q)$ 和 $\bar{g}(q)$ 是对应的共轭滤波器的系数。

由卷积型的小波包变换重构算法表达式可以看出,在进行迭代运算时,卷积型的小波包变换方法不采取隔二抽一的采用方式,仅仅是平移了上一尺度的分解结果,故各个层的各个频带序列长度等于原来信号的长度。这种方法的优点就是避免了传统小波包方法由于不同分解尺度中分解信号样本个数会

因为增加的分解尺度而指数下降这一缺点^[11]。

对于基于卷积型小波包能量矩的特征的提取步骤如下:

1)使用多层卷积型小波包对采样信号进行处理,对最终分解层的各个频带成份的特征进行提取。

2)对各个频带信号能量灰度矩进行求解。 b 层分解层的第 n 个频带信号的能力灰度矩表示为 Γ_{bn} ,那么 Γ_{bn} 表示为

$$\Gamma_{bn}=\sum_{\lambda=1}^N\lambda\mid a_{bn}(\lambda)\mid^2\tag{4}$$

式中: N 是采样总数; b 是分解层数; $a_{bn}(\lambda)$ 是小波包分解系数。

3)由于各个频带内的信号能量矩受到系统故障影响较大,故构造使用能量矩作为元素的归一化特征向量:

$$Q=[\Gamma_{b0},\Gamma_{b1}\cdots,\Gamma_{b(2^b-1)}]/\sum_{n=0}^{2^b-1}\Gamma_{bn}\tag{5}$$

4)使用 BP 神经网络对上面得到的特征向量进行故障定位^[12]。

2 改进遗传算法优化 BP 神经网络模型

2.1 常规遗传算法

BP 神经网络算法的遗传算法优化过程表述为

$$\begin{cases} E_1(v,w,\zeta,\eta)\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{M_1}\sum_{t=1}^m[y_i(t)-\hat{y}_i(t)]^2 \\ s,t,w\in R^{m\times p},v\in R^{p\times n},\zeta\in R^p,\eta\in R^n \end{cases}\tag{6}$$

式中: E_1 是 BP 神经网络输出与期望输出的误差; $y_i(t)$ 是期望的网络输出; $\hat{y}(t)$ 是 BP 神经网络的输出。

对 BP 神经网络权值的修正方法为

$$\Delta w_{ij}(n)=-\eta g(n)+\alpha\Delta w_{ij}(n-1)\tag{7}$$

式中: η 是自适应学习率; α 是动量算子; n 是迭代步数^[13]。

使用遗传算法优化的 BP 神经网络建立接地故障检测模型过程如下:

1)建立常规 BP 神经网络模型并对网络模型的结构参数进行初始化;

2)使用常规的遗传算法对 BP 神经网络进行参数优化;

3)使用通过遗传算法优化得到的最佳 BP 神经网络结构及权值、阈值等参数对 BP 神经网络模型进行更新,对建立的模型使用训练样本进行训练以提高模型的泛化能力;

4)使用测试样本进行模型性能测试。
整个模型的建立过程如图 1 所示^[14]。

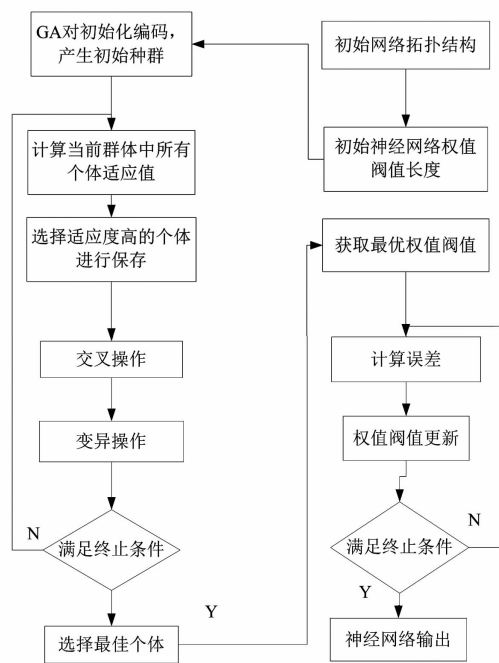


图 1 建立常规遗传算法优化 BP 神经网络模型流程

2.2 改进遗传优化算法

由于传统的遗传算法搜索过程中,出现的高适应值个体会对搜索过程产生干扰,影响遗传算法的性能,故需要对其进行改进。使用下面的混合编码方式对传统遗传算法进行改进。

1) 混合编码方案

由于二进制编码和实数编码各有各的优点和缺点,故通过混合两种编码方式,发挥二进制编码的操作简便易于实现、实数编码的高精度等优势,从而提高遗传算法的效率及全局搜索能力。

2) 选择算子

使用排序法计算个体的选取概率:

$$P_i = q'(1 - P_{\max})^{n(i) - 1} \tag{8}$$

$$q' = \frac{P_{\max}}{1 - (1 - P_{\max})^L} \tag{9}$$

式中: $P_{\max}$ 是染色体选取概率的最佳值; $n(i)$ 是第 i 个染色体适应值的顺序。

3) 交叉算子

在二进制的编码过程中,使用单点交叉法进行交叉操作:

$$\begin{aligned} (a_1 a_2 \cdots a_k a_{k+1} \cdots a_m) &\Rightarrow (a_1 a_2 \cdots a_k b_{k+1} \cdots b_m) \\ (b_1 b_2 \cdots b_k b_{k+1} \cdots b_m) &\Rightarrow (b_1 b_2 \cdots b_k a_{k+1} \cdots a_m) \end{aligned} \tag{10}$$

在进行实数编码过程中,使用算数交叉法得到交叉算子为

$$\begin{cases} X_i'' = X_i^l c_i + X_i^l (1 - c_i) \\ X_j' = X_j^l c_i + X_i^l (1 - c_i) \end{cases} \tag{11}$$

式中: $X_i^l X_j^l$ 和 $X_i' X_j'$ 分别是交叉前后的一对个体; c 是随机数,范围在 $0 \sim 1$ 之间^[15]。

4) 变异算子

在混合编码的二进制编码和实数编码过程分别使用基本位变异和非均匀变异操作。非均匀变异操作新基因值 x'_k 为

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, U_{\max}^k - \eta_k), rsndom(0, 1) = 0 \\ x_k - \Delta(t, \eta_k - U_{\min}^k), random(0, 1) = 1 \end{cases} \tag{12}$$

式中: $\Delta(t, U_{\max}^k - \eta_k)$ 和 $\Delta(t, \eta_k - U_{\min}^k)$ 分别是 $[0, U_{\max}^k - \eta_k]$ 范围内和 $[0, \eta_k - U_{\min}^k]$ 范围内的随机数。

5) 确定交叉和变异概率

遗传算法的性能会受到交叉概率 P_c 以及变异概率 P_m 较大影响,因此使用能够避免破坏高适应值,保证种群多样性的自适应交叉概率和变异概率:

$$P_c = \begin{cases} \lambda_1 (f_{\max} - f') / (f_{\max} - \bar{f}), & f' \geq \bar{f} \\ \lambda_2, & f' < \bar{f} \end{cases} \tag{13}$$

$$P_m = \begin{cases} \lambda_3 (f_{\max} - f) / (f_{\max} - \bar{f}), & f \geq \bar{f} \\ \lambda_4, & f < \bar{f} \end{cases} \tag{14}$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 均为 $0 \sim 1$ 的参数; $f_{\max}$ 是最大适应值; f 是已经变异个体的适应值; $\bar{f}$ 是适应值均值; f' 是交叉互换适应值中较大值^[16]。

3 实验研究

3.1 实验条件

为了通过实验对所提出的单相接地故障定位方法进行研究,选用一个小电流接地配电系统作为实验对象。该系统为 110 kV 转 10 kV,出线为 5 条 10 kV 的系统。当主变压器的中性点不接地时,使用的接线方式是 Y/ Δ ,当主变压器使用谐振接地时,使用的接线方式是 Y/ Y_n 。配电变压器使用的接线方式均为 Δ/Y_n 。用于实验的配电系统中,线路 1 为架空线路,线路 2 为电缆线路,线路 3 为架空/电缆混合线路,线路 4 为架空线路,线路 5 为架空线路,线路长度分别为 25 km、12 km、15 km、10 km、20 km。线路

1、3、4、5 的各序参数均相同:正序、零序电阻为 0.52 Ω/km 和 0.68 Ω/km ,正序、零序电容为 0.075 $\mu\text{F}/\text{km}$ 和 0.042 $\mu\text{F}/\text{km}$,正序、零序电感为 1.325 mH/km 和 3.845 mH/km 。线路 2 的各序参数:正序、零序电阻为 0.081 Ω/km 和 0.152 Ω/km ,正序、零序电容为 0.301 $\mu\text{F}/\text{km}$ 和 0.075 $\mu\text{F}/\text{km}$,正序、零序电感为 0.256 mH/km 和 0.861 mH/km 。

3.2 实验模型建立

使用 Matlab 建立所研究的基于改进遗传算法优化 BP 神经网络的单相接地故障定位模型,同时建立基于传统 BP 神经网络的单相接地故障定位模型加以对比。

神经网络的结构为 3 层结构,输入神经元个数为 5,即用于故障定位的输入特征向量:各层过渡电阻、各层的故障点以及使用卷积小波包得到的故障情况的特征向量。输出神经元个数为 1,即诊断的故障位置信息。设定学习速率为 0.05,传统的 BP 神经网络的隐含层参数以及其他权值、阈值等均是初始化时设定,所研究的改进遗传算法优化 BP 神经网络的模型参数经过训练由改进遗传算法得到最优值并进行赋值。

进行单相接地故障定位研究时,以上述的实验模型得到第一条线路的故障定位为例加以实验说明。采用的训练样本使用过渡电阻为 0 Ω 、60 Ω 、120 Ω 、600 Ω 以及 1 200 Ω ,1 km 的故障步长形成的数据样本。

两种算法模型通过训练得到的网络误差平方和响应曲线如图 2 所示,可以看出相比传统的 BP 神经网络,研究模型通过混合编码方式对个体交叉及变异概率进行调整,从而得到最优的 BP 神经网络隐含层参数以及其他权值、阈值等,使得模型的训练速度更快,精度更高。

3.3 实验结果分析

使用上述建立的模型对测试样本进行测试,采用的测试样本使用过渡电阻为 20 Ω 、100 Ω 、200 Ω 、500 Ω 以及 1 000 Ω ,0.6 km 的故障步长形成的数据样本。得到了两种模型的定位结果及误差,见表 1。

表 1 两种模型的故障定位结果

故障位置 /km	所研究方法		常规 BP 神经网络	
	定位结果 /km	相对误差	定位结果 /km	相对误差
0.6	0.62	4.12	0.64	6.06
2.4	2.49	3.82	2.54	5.69
3.6	3.78	5.13	3.97	10.36
6	6.05	0.84	6.14	2.34
8.4	8.46	0.69	8.61	2.51
10.2	10.30	0.96	10.51	3.06
13.2	13.26	0.48	13.41	1.57
15	15.14	0.92	15.38	2.52
16.8	16.86	0.37	17.19	2.30
18.6	18.75	0.81	18.96	1.92
19.2	19.25	0.28	19.59	2.03
21.6	21.72	0.57	22.14	2.49
22.8	23.02	0.96	23.37	2.51
24	24.15	0.62	24.55	2.28
24.6	24.77	0.69	25.08	1.96

测试结果可以看出,所研究方法的故障定位相对误差平均为 1.42%,除个别点外,其他测试点的相对误差均低于 1%。传统 BP 神经网络算法建立的故障定位的平均相对误差为 3.31%,研究结果表明,使用所提的改进算法,故障定位的精度有了较大改善,验证了所提出方法的可行性。

(下转第 48 页)

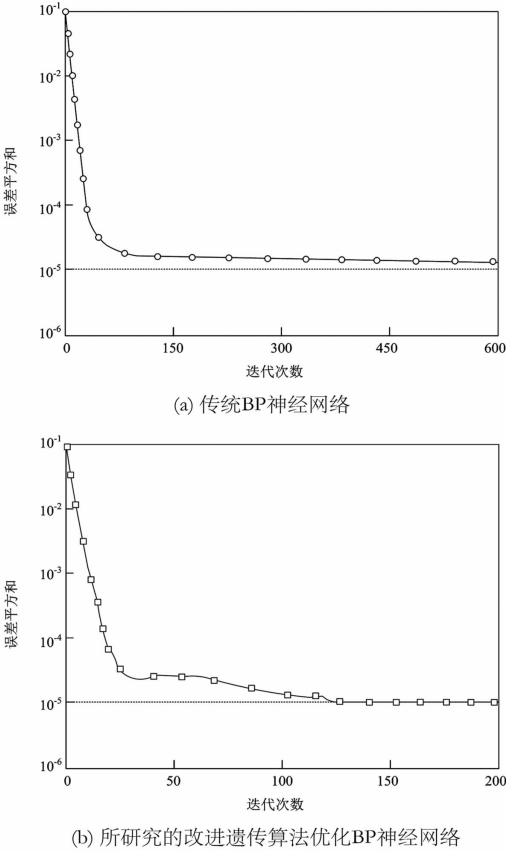


图 2 两种算法的网络误差平方和响应曲线

变电设备在线监测装置校准技术综述

刘志宏¹, 陈 纓², 王炳强¹, 刘益岑², 范松海², 甘德刚², 唐 平²
(1. 国网西藏电力有限公司电力科学研究院, 西藏 拉萨 850000;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:介绍了变电设备在线监测装置校准技术,包括变压器油中溶解气体、局部放电、铁心接地电流、套管介损以及六氟化硫湿度 5 种类型在线监测装置的校准方法,提出了在线监测装置全过程校准工作体系,并指出了在线监测装置校准工作的必要性和经济效益。

关键词:变电设备; 在线监测装置; 校准; 综述

Abstract: The calibration technologies of five kinds of on-line monitoring device for substation equipment are introduced, including on-line monitoring devices for dissolved gas in oil, partial discharge, iron core grounding current, casing dielectric loss and SF₆ micro water. The work system of the whole process calibration of on-line monitoring device is presented, and the necessity and economic benefit of the on-line monitoring equipment calibration are pointed out.

Key words: substation equipment; on-line monitoring device; calibration; summary

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0041-04

0 引 言

随着电力设备状态检修工作的深入,状态监测技术广泛应用到输变电设备的日常状态检(监)测和分析。依靠状态监测装置对运行设备开展监测,及时、准确地掌握设备运行状态,保证设备的安全、可靠和经济运行已成为电力系统重要的技术手段^[1]。在线监测技术已发展了几十年,随着传感器技术、通信技术和诊断技术的不断发展,在线监测产品日趋成熟。然而由于各生产厂家产品质量良莠不齐、运维单位维护不到位、在线监测产品现场运行环境恶劣等多种因素,致使在线监测装置的准确性和可靠性不高,导致这些问题的原因有 3 个方面:

1) 缺少统一的技术标准对在线监测产品进行出厂检验。绝大多数在线监测系统测量原理基本上都是依据离线试验时的 IEC、IEEE 标准或者国家标准,但其产品制造、检验、校正、数据分析判断等都没有在线检测技术标准,这使用户很难识别其产品性能是否达到实际检测要求,因此即使检测到故障,一般还需要停电进行其他试验作为比对。

2) 现场在线监测装置运行维护水平不高。现

在国内很多一次设备安装了在线监测装置,但据调查实际正常运行的只占 30% 左右。这里有两方面的原因:一是装置本身稳定性较差;另一方面运维人员未接受专门的技术培训,对于非正常运行的装置不具备及时处理的能力。

3) 变电站现场运行环境恶劣。在线监测产品通常安装在户外,安装地域海拔跨度大(0~4 000 m),温度范围广(-40℃~60℃),尤其是西藏以及川西高原地区,高海拔、强紫外、昼夜温差大,运行环境极为恶劣。由于极端气候越来越频发,易导致在线监测装置在恶劣环境条件下的准确性得不到保障。

随着智能电网的发展,变电站一次设备的在线监测日趋成熟,其测量数据的准确度将直接影响到设备状态评价的准确性和可靠性,对其进行校准和校验是提高状态监测测量数据的准确性和可靠性的有效途径,从而提高状态评价系统对主设备状态评价的有效性。

1 油中溶解气体在线监测装置校准技术

油中溶解气体在线监测装置利用气相色谱法检测油中溶解气体^[2],从取油样-油气分离-色谱分

析的全过程来看,存在着环节多、操作手续繁琐、试验周期长等弊病,不可避免地引进较大的试验误差,对于发展较快的故障的检测不够及时^[3],其校准方法主要包括:实验室色谱数据比对法、标准气体比对法、油箱配油比对法以及标准油样法。

1.1 实验室色谱数据比对法

取运行中的变压器油,利用实验室气相色谱仪进行检测,将结果与变压器油中溶解气体在线监测装置检测数据进行对比,判断分析两者检测结果是否一致,对误差进行分析,从而判断装置的检测结果是否准确可靠。由于现场条件等因素的影响,如采样油路设计不合理、油路污堵,都会造成所取油样不具代表性,从而导致测量结果偏差较大。因此,利用实验室色谱进行的数据比对,不能准确判断现场在线色谱仪的检测数据是否准确、可靠。除不适宜进行现场校准外,该方法耗时长、操作繁琐、人为操作影响较大,不适合大批量校准工作。

1.2 标准气体比对法

使用一组或多组浓度的标准气体,检验在线监测数据是否准确,从而实现油中溶解气体在线监测装置的比对校准工作。由于目前市面上的油中溶解气体在线监测装置往往都包含油气分离、组分分离和气体检测三大过程,仅靠标准气体进行比对校准时,只是校准了设备的气体检测单元,而没有兼顾到设备油气分离单元和组分分离单元^[4],因此,此种方法往往意义不大。

1.3 油箱配油比对法

向固定体积的油箱里装一定体积空白的变压器油,采用真空脱气或高纯氮脱气,然后通入一定量的标准气体并搅拌均匀,待油样配制均匀后,通过实验室色谱仪完成标准油样的定标工作。最后标准油样依靠自身重力作用注入油中溶解气体在线监测装置中进行分析测试,将得到的结果与实验室色谱仪的测试结果进行比较分析,从而完成在线色谱仪的比对校准工作。这种方法存在以下问题:1)特征气体浓度控制精度低,很难根据需求配制出非常小或非常大的浓度;2)油样浓度不稳定,易漂移;3)配油样用标气无法定量,油样中各特征气浓度不能自由合理配制,特别是含单组份特征气体的油样无法配制;4)油样切换浓度不便,特别是高浓度变低浓度,需要数小时或更长时间;5)敞开式油箱设计,密封性差,油样含量易受外界空气中水分、氧气的影响;6)

油样循环能力差,气液混合接触面积小,配油时间长^[5]。

1.4 标准油样法

传统常规标准油样校准法采用实验室色谱对比法,常用到标准油样这一试剂,小需求量可用手动配制,但在工业应用中大批量使用必然要求自动化的制作标样设备。国家电网公司企业标准《变电设备在线监测装置检验规范》第 1、第 2 两部分规定了标油检验方法,对于具体的制油装置并未给予规定。

通过设计专门的变压器标准油样装置,可配制一定特征气体含量的标准油。该方法将变压器油特征气体与变压器新油以一定配比混合,达到气液溶解平衡,其配制的样品油浓度经实验室色谱仪标定,其标定浓度数据接近其配比的理论浓度,可将配制的理论浓度油样作为标准油样,直接用于油中溶解气体在线监测装置检测,以已知理论浓度的标准油样为基准物,实现对在线监测装置的检验要求。不需再多次以实验室色谱仪标定对比,实验室、变电站现场都可使用。该技术自动化制作标准油样,自动进气,减少了手动进气的误差,适于工业应用中大量制标油、批量检验。对于需要对油中溶解气体在线监测产品进行大量检定工作的各电科院以及大型变电站,都具有重要的应用价值。

2 局部放电在线监测装置校验技术

传统脉冲电流法局部放电已有相应的标准和溯源方法,但脉冲电流法不适宜于在线监测。目前,局部放电在线监测主要采用高频电流法和超高频法^[6],而对于高频电流和超高频法的局部放电在线监测数据的准确性校验还没有制定相应的规范。

2.1 高频电流局部放电在线监测校验技术

高频电流法局部放电在线监测装置可采集高频脉冲电流信号,是在足够宽的检测频带范围内检测局部放电产生的脉冲电流信号,局部放电信号一般通过安装在被测设备接地线上的穿心式电流传感器或钳型电流传感器来获得,因此可以通过标准信号源进行校验。该信号源产生标准宽频源信号经宽频功率放大器相应耦合电容实现局部放电宽频脉冲电流检测的校准。该方法可对高频电流传感器幅频特性、传输阻抗特性以及整套装置灵敏度和对固定频率干扰信号的抑制效果进行检测。

2.2 超高频局部放电在线监测校验技术

在超高频局部放电传感器校验方面,目前缺乏统一的标准和科学有效的手段,众多的局部放电设备厂商提供的产品各异且质量参差不齐,检测效果不佳,出现错误报警。常规的对传感器校验的方法是扫频法,但是扫频测试无法准确反映传感器和检测系统对于瞬态局部放电超高频信号的接收能力,扫频测量系统所必需的扫频信号源等设备极其昂贵,对于检测系统性能方面,国内外也缺乏一致和有效的评价方法。

3 铁心接地电流在线监测装置校准技术

采用标准电流源可对铁心接地电流在线监测装置进行校准,但此方法一般应用于实验室内的校准。如果在线监测装置已经安装在变电站现场,采用电流标准源来校准则需要解决同步的问题,让电流标准源产生的信号与铁心接地电流的相位对应。当前,市面上已有铁心接地电流标准源装置,该装置能够产生铁心接地电流模拟信号,通过该电流标准源即可对铁心接地电流在线监测装置进行现场校准。

4 套管介损在线监测装置校准技术

目前,对于套管介损在线监测装置检测数据的准确性,国家电网公司企业标准《变电设备在线监测装置检验规范》第 1、第 3 两部分规定了两种检验方法,包括高压试验电路和低压试验电路,不论是高压试验电路和低压试压电路都是通过模拟介损的方式,与标准测量仪器检测数据的对比来进行溯源。

其溯源主要是依据电流、电压提取,然后经过被检仪器和标准仪器对比进行溯源,其关键是被检仪器和标准仪器采集的相同电流、电压,且电流、电压的相位和幅值能够计算出介损等。因此,通过输出标准的电流和电压模拟信号,从而实现对套管介损在线监测装置的校准。套管介损标准源需要解决的问题主要有以下几个:1) 电流、电压相位问题;2) 电流电压幅值问题。

5 SF₆ 湿度在线监测装置校准技术

六氟化硫湿度的测量方法是露点法,露点法原

理是当一定体积的气体在恒定的压力下均匀降温时,气体和气体中水分的分压保持不变,直至气体中的水分达到饱和状态,该状态下的温度就是气体的露点。通常是在气体流经的测定室中安装镜面及其附件,通过测定在单位时间内离开和返回镜面的水分子数达到动态平衡时的镜面温度来确定气体的露点。一定的气体水分含量对应一个露点温度;同时一个露点温度对应一定的气体水分含量。因此测定气体的露点温度就可以测定气体的水分含量。由露点值可以计算出气体中微量水分含量,由露点和所测气体的温度可以得到气体的相对水分含量^[6]。SF₆ 湿度在线监测装置主要采用标准露点测量装置与被试装置进行比对校准。

6 在线监测装置校准校验应用

当前,为了对在线监测装置进行精益化管理和运行,提高其运行性能,电力部门越来越重视装置的校准校验工作,从物资采购 - 基建 - 运行 - 检修,可形成一整套全过程管理体系,如图 1 所示。

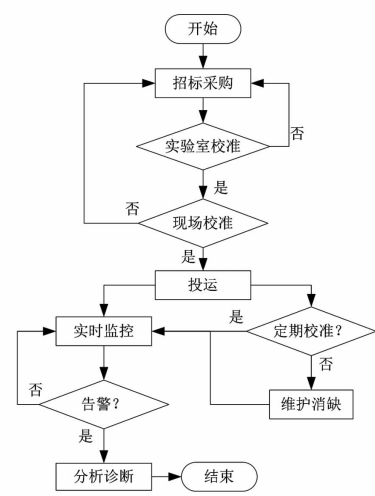


图 1 在线监测装置校准体系

1) 物资招标阶段:以物资抽检的形势,通过实验室校准,保证采购的在线监测装置满足需求部门的各项指标,从源头上保险证装置的质量;

2) 基建阶段:在安装调试阶段,通过现场校准,保证在线监测装置在满足准确性和可靠性要求的情况下投运,并接入至输变电设备状态监测系统;

3) 运行阶段:通过设置预告警阈值,将在线监测装置纳入调控机构进行实时监控,并对告警信号进行分析;

4)检修阶段:通过定期的校准试验,对故障装置进行维护,以此保证在线监测装置运行质量的稳定性。

7 结 语

在线监测设备测量数据的准确性将直接影响设备状态评价的可靠性。因此,对在线监测装置进行校准,确保其监测设备状态数据精度满足状态评价系统的运行要求,可应用于生产厂家、电力公司入网检测等需要对变电设备在线监测装置进行检测的场所,从而确保在线监测装置测量数据的准确性和可靠性,提高对设备状态评价的有效性。开展在线监测装置校准校验技术研究,研发实验室和现场校准仪器,建立健全校准校验机制,将对电力部门具有直接的经济效益:1)为入网检测和物资抽检工作提供技术手段,应用于在线监测装置生产厂家的出厂检验、网省电力公司物资采购入网检测等需要对在线监测装置进行性能检测的场所;2)提升在线监测装置应用效果,对投运的在线监测装置进行跟踪分析,对其监测数据准确性进行检测检验,确保其监测设备状态数据精度满足状态评价系统的运行要求,从

而提高在线监测装置测量数据的准确性和可靠性,提高对设备状态评价的有效性。

参考文献

[1] 王璐,王鹏. 电气设备在线监测与状态检修技术[J]. 现代电力, 2002, 19(5): 40-45.

[2] 贾瑞君, 关于变压器油中溶解气体在线监测的综述[J]. 电网技术, 1998, 22(5): 49-55.

[3] 王梦君,任婷艳,付强. 变压器油中气体在线监测装置检定技术发展研究[J]. 电工电气, 2015(12): 1-5.

[4] 卢立秋,郭军科,张桂贤,等. 变压器在线色谱仪运行中的校准技术[J]. 供用电, 2009, 26(4): 62-64.

[5] 周永勤,穆志维,王珂. 变压器油在线监测技术发展现状及其校验方法探究[J]. 化工时刊,2014, 28(8): 33-35.

[6] 黄兴泉,赵善俊,宋志国,等. 用超高频局部放电测量法实现电力变压器局部放电的在线监测[J]. 中国电力, 2004, 37(8): 52-56.

[7] 胡雨龙. 六氟化硫绝缘开关气体中微水含量在线监测原理与方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002:43-44.

(收稿日期:2016-03-10)

(上接第 36 页)

平衡原理,样品 A 油中溶解的氦气浓度按式(5)进行计算。

$$C_i = \frac{C_{ig} [C_{ig} \times r_1 + C'_{ig} (r_2 - r_1)]}{C_{ig} - C'_{ig}}$$
$$= \frac{284.16 [2\,841.64 \times 0.086 + 249.76 \times (0.245 - 0.086)]}{2\,841.64 - 249.76}$$
$$= 311.68 \tag{5}$$

同理样品 B 油中溶解的氦气浓度为

$$C_i = \frac{C_{ig} [C_{ig} \times r_1 + C'_{ig} (r_2 - r_1)]}{C_{ig} - C'_{ig}}$$
$$= \frac{2\,862.97 [2\,862.97 \times 0.091 + 243.55 \times (0.248 - 0.091)]}{2\,862.97 - 243.55}$$
$$= 326.55$$

样品 A、B 油中溶解的氦气的平均浓度为

$$G_p = \frac{311.68 + 326.55}{2} = 319.12 \text{ }\mu\text{L/L}$$

4 结 论

前面对变压器绝缘油中溶解的氦气组分的确认方法及浓度的测试过程进行了阐述,对进一步规范和提高广大油务人员的测试水平,提高测试数据的准确度,保证设备的安全运行具有一定的意义。

参考文献

[1] GB/T 7252-2001,变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].

[2] GB/T 17623-1998,绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法[S].

作者简介:

胡仕红(1975),高级工程师,从事电力用油(气)试验及研究工作;

鲁登峰(1973),高级工程师,从事电力系统热工自动化设计、调作。

(收稿日期:2015-11-12)

基于 CIM 标准的四川省电网图模数集成方法研究

周 剑¹,张国芳¹,代宇涵²

- (1. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:随着调度自动化主站技术的发展,分级电网管理并对外网等值的建模方式已经无法满足电力系统分析与计算对大电网、大数据的需求。传统建模方式中,边界处设备被等值所导致的辖区外电网模型动态特性缺失易导致辖区内电网状态估计与潮流计算的局限性。结合四川电网分布广、区域划分多、模型离散度大等特性,优化图模数集成方法,阐述了边界设备智能查询、ID 重构、比对增量入库、模糊匹配等方法实现模型、数据与图形的省地一体化集成^[1]。

关键词:CIME 文件解析;模型合并;智能边界查询;ID 重构;模糊匹配

Abstract:With the development of dispatching automation technology, hierarchical power grid management and external network equivalent modeling method cannot meet the requirements of power system analysis and calculation for large power grids and huge data. In traditional modeling method, there lacks the dynamic characteristics of power grid model of the equipment in the boundary caused by the equivalents, which can easily lead to the limitation of state estimation and power flow calculation. Due to the features of wide distribution, many region partition, large discrete degree of model in Sichuan power grid, the model – data – graph integration method is optimized, and the smart border – searching, ID reconstruction, incremental loading, fuzzy matching and other methods are presented to achieve the model – data – graphic integration.

Key words:CIM file analysis; model merging; smart border – searching; ID reconstruction; fuzzy matching

中图分类号:TM76 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0045 – 04

0 引 言

四川电网以行政区域作为依据划分为 21 个地区电网调度,但是电网规划独立于行政区域划分,电网电气联系和区域划分并不一致,地调自动化系统不统一,导致地调与省调掌握的电网信息难以满足一致性、完整性、可靠性与实时性方面的要求。省地调图模数一体化集成的工作可以整合四川电网省调及各地调调度控制系统模型、图形及电网运行信息,提供统一模型管理及电网分析计算平台。

传统拼接方式在进行大规模模型合并的过程中面临边界数量巨大,冗余模型难以切除,设备命名规范不统一,实测数据易发生跳变等诸多困难。省地调大规模图模数一体化集成工作在全国范围内实用化程度不高^[2]。此外由于在模型合并过程中需要切除公共建模部分的重复量测点,缺少量测的厂站

图与潮流图会相应失去使用价值。

针对上述局限性,提出了基于 CIM 规范的图模数各自新的集成思路,通过 CIME 模型解析、智能边界查询、ID 重构、字段模糊匹配等多项技术,解决了模型合并中多系统融合的问题,提高了模型合并工作的可靠性。这些技术的使用可极大降低模型数据合并对省地两级调度状态估计的冲击,为调度自动化高级应用提供实时性更高的模型数据以及实用性更强的图形。

1 知识点描述

1.1 电网模型

电网模型通用描述规范(CIM based efficient model exchange format),简称 CIME。CIME 是在 IEC 61970 – 301 电力系统公用数据模型的基础上,为解决 CIM/XML 方式进行描述时的效率问题而开发的

一种新型高效的电力系统数据描述规范,具有简洁、高效和适用于描述和交换大型电网模型的特点。目前国内大部分调度系统平台都遵循 IEC 61970 标准,支持使用 CIM 描述电网结构,支持 CIM 文件的导入和导出^[3],采用 CIM 规范作为图形与模型标准为四川省地一体化建设的多系统平台融合提供了便捷。

1.2 模型合并

模型合并利用各调度单位调管范围内的电网模型在调度边界处通过拆分、组合,拼接出全网电网模型。各调度不同系统提供的模型文件格式及所包含域必须遵照《CIME 电网物理模型描述与交换规范》,相同设备需使用统一的参数列表,共享区域 ID 编码方式。

2 模型集成关键技术

2.1 一致性建模

四川地调模型拓扑离散度高,孤岛数量多且不同地调建模系统不同,为模型边界维护、图形量测关联带来了巨大困难。基于 CIM 规范的模型与图形文件为模型合并提供了可能性。本方法对不同系统建模提出如下要求:1)模型必须包含调度边界设备及连接关系;2)模型导电设备参数齐全,满足高级应用软件和调度员培训仿真系统的需要^[4];3)模型拓扑连接正确;4)模型中量测对象完整;5)模型符合原子性原则,在 CIME 文件中厂站为最小单元,即一个文件中的数据模型是若干个厂站的集合,不能只包含电压等级和设备而没有它们所属的厂站^[4-5]。

2.2 高效模型解析

针对四川电网模型规模大、电厂数量多等特点,模型切除与合并耗时较长,成为为分级电网数模图同步的瓶颈。解决大批量文件处理的效率问题是模型合并关键技术之一。因此需要根据 CIME 文件的特点,采用共享内存高速索引技术,研究 CIME 文件的专用解析器。所提出的 CIME 解析工具从两个方面成功地解决了效率问题:1)利用共享内存技术成功避免了大量的 I/O^[6];2)采用快速排序与检索算法提高了共享内存中海量数据的检索效率。该 CIME 文件工具作为模型合并的基础,为后续的所有操作共享内存。

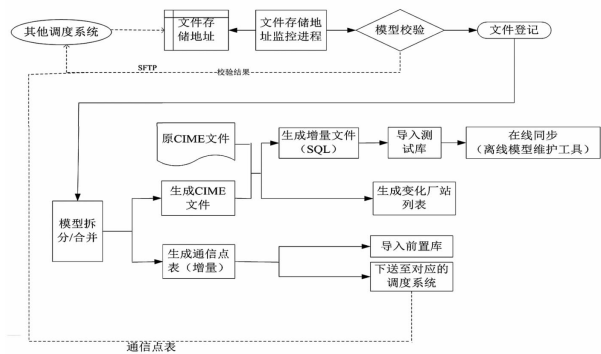


图 1 模型合并架构

3 图模数集成创新性

3.1 模型校验与共享

在进行合并之前需要检测参与合并的子模型拓扑及参数是否符合 CIM 规范。因为子模型存在跨系统偏差,除对拓扑连接进行校验外,还需针对模型参数格式、设备及关联量测重复等错误提出告警,最大化实现拼接后模型的相容性与可靠性。实用过程中难以保证子模型的独立性,因为跨系统导出的子模型存在设备 ID 与命名重复等潜在缺陷^[7-8],所提方法遵从唯一性原则对设备与量测 ID 重构,将不同系统的建模进行结构调整,最终通过高速内存实现设备与拓扑共享。

3.2 智能边界查询

古典的模型合并方式是:1+1 类型的简单模型合并^[9],即每次实现本级调度与下级一个调度进行模型合并。提出基于 1+n 的多系统模型合并新方案,实现本级调度和 n 个下级调度模型的同时合并,即在参与拼接的模型中两模型间设置边界,提高低电压等级模型的准确性和及时性。同时可以将上述两种模式合成,形成 1+1+n 模式的模型合并,即实现网调、省调、地调的 3 级电网调度模型的一体化建模。

传统模型合并方式选择线路或者隔离开关作为边界,将会带来以下问题:1)边界设备不具备唯一性且缺乏一致性规律,难以实现智能检索;2)边界处出线多,边界维护量大,边界处拓扑变化频繁,手动维护繁琐。针对四川省模型划分区域多,边界拓扑复杂等情况,提出新的设备边界设置规则:以 220 kV 厂站主变压器高压侧绕组作为边界,220 kV 母线及所有间隔由参与拼接的省调维护,110 kV 母线

及所有间隔由参与拼接的地调维护,如图 2 所示。

由于 220 kV 厂站数量相对较少,省、地对边界设备(高压侧绕组)以及边界内侧设备(主变压器)有统一的命名规范。通过 CIME 文件中的电压等级筛选出 220 kV 厂站作为边界厂站,再利用统一的主变压器命名字段进行模糊匹配,从而产生边界列表以及边界内侧设备列表,实现智能化模型边界查找与维护。

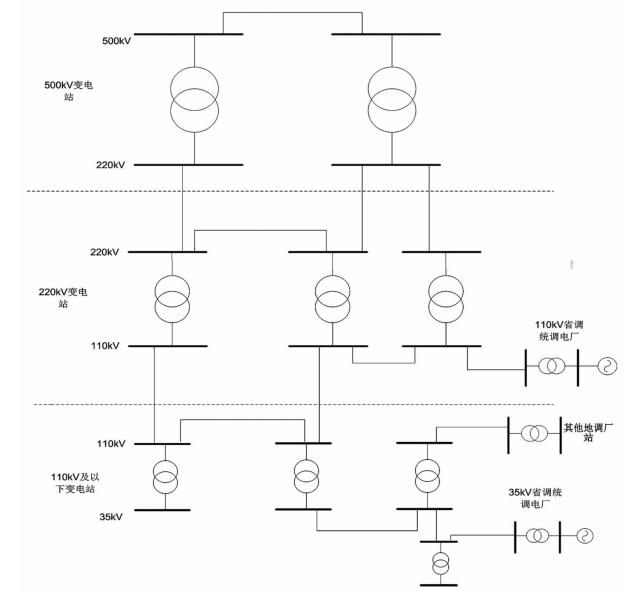


图 2 模型边界划分

3.3 高效模型同步

在大规模模型合并过程中,不同系统导出生成的全模型节点多,遥信遥测数据量巨大,模型更新与系统实时同步难以得到保障^[10]。所提方法对数据库结构分层,采用增量对比的方法将模型同步时间由数小时级别缩短至数分钟级别。

数据同步是实时数据集成管理的基础,在传统模型合并过程中,全模型与子模型间通过通信链路全点表来实现数据交换^[11-12],如果子模型发生增删或修改,通信链路中与之对应的点表会产生错位。点表错位与重新导入过程中导致的量测跳变容易导致高级应用的错误决策。所提方法对通信链路点号进行排序,通过增量点表导入,确保模型变更引起的点表差异最小化。对于庞大模型包含量测数量超过跨系统限制值——10 000 条的情况,通过链路拆分与自动排序使得点表规模小于最大限制,也将每次点表变化量控制在 100 条以内。所提方法已确保在线系统实时数据刷新频率 1 Hz 时实测数据不发生跳变。采集装置的采集频率提高后,可进一步满足

毫秒级采样^[13-14]的需求。

3.4 多系统图形匹配

模型合并需要图形匹配来提高其可视性与直观性。模型合并过程中对边界处重复建模进行切除,边界厂站图(或潮流图)因为缺少对应量测成为残缺图。由于合并边界处被切除的设备与所保留的内侧设备来自不同地调系统平台,设备 ID 在合并过程中需进行唯一性处理并进行转换。通过对设备命名与量测模糊匹配形成切除设备 ID 对照表,将量测 ID 编码进行重构,完善量测关联度。借助合理的模糊匹配规则,确保被部分切除量测厂站图(或潮流图)的完整性。

4 运行测试

前面介绍的图模数集成方法在四川省地一体化平台使用,形成图模数一体化的模型中心。一体化模型中心现已常态化对省调在内的 22 个子模型进行模型拼接,智能维护边界超过 600 条,全模型包含 10 ~ 500 kV 四川省电网一次模型。图形匹配后可以完整查阅全网厂站图及潮流图。单次模型拓扑切除与拼接可 20 min 内自动完成,子模型间全通信链路更新时长控制在 1 h 内,为模型中心提供完整拓扑与可靠数据的同时,极大提高了模型合并与数据同步的效率。

5 结 论

所提出的 CIME 模型解析、智能边界查找、ID 重构、模糊匹配等方法为四川省地一体化模型中心建设提供了高效同步的图模数集成途径。优化后高效的模型合并技术、数据采集通道与图形匹配功能,为调度系统的横向协同、纵向贯通带来便捷。实用化与常态化的图模数集成与同步为提高互联大电网的在线监控、动态和静态安全稳定分析水平提供信息基础和技术支撑。

参考文献

[1] 钱锋,唐国庆,顾全. 基于 CIM 标准的多级电网模型集成分析[J]. 电网技术,2007,31(12):69-73.

[2] 钱锋,唐国庆,顾全. 基于 CIM 标准和 SVG 的分散式图模合并[J]. 电力系统自动化,2007,31(5):84-89.

[3] 钱静,范广民,何蕾,等. 分布式协同建模技术在综合数据平台中的实现[J]. 电网技术,2009,33(20):136-141.

[4] 米为民,李立新,尚学伟,等. 互联电力系统分层分解时空协调建模研究[J]. 电力系统自动化,2009,33(15):56-61.

[5] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等. IEC61970 标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J]. 电网技术,2005,29(16):21-25.

[6] IEC 61970, Energy Management System Application Program Interface (EMS-API) Part 1: Guidelines and General Requirements[S]. 2003.

[7] IEC, CPSM Minimum Data Requirements in Terms of the EPRI CIM[S]. 2004.

[8] 孙宏斌,李鹏,李矛,等. 中国南方电网在线分布式建模系统研究与设计[J]. 电力系统自动化,2007,31(10):82-86.

[9] 刘崇茹,孙宏斌,张伯明,等. 公共信息模型拆分与合并应用研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(12):51-55.

[10] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.

[11] 何江,吴杏平,李立新,等. 基于组件技术的电力系统实时数据库平台[J]. 电网技术,2002,26(3):64-67.

[12] 邹根华,黄伟,姚诸香,等. 考虑外网等值的江西电网模型拼接实现方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):94-97.

(收稿日期:2015-10-12)

(上接第 40 页)

4 结 论

快速定位故障线路位置及时解决单相接地引起的配电系统故障是目前急需研究解决的主要问题之一。针对小电流接地时,由于电流非常微弱并且配电网出现分支非常多,难以进行定位这一问题,使用卷积小波包能量矩对发生单相接地故障时的稳态和暂态特征进行提取,再使用 BP 神经网络建立接地故障定位模型。为提高 BP 神经网络效率,避免陷入局部最小值,使用通过混合编码方式改进的遗传算法对 BP 神经网络进行优化。最后通过实验对一种配电系统模型的单相接地故障定位进行实验研究,结果表明,针对该系统所研究方法的故障定位平均相对误差比传统 BP 神经网络算法建立的故障定位的平均相对误差降低了 1.89%,具有较好的定位性能和较高的效率。

说明所研究方法的定位性能要明显优于常规 BP 神经网络模型,对于 BP 神经网络的结构、权值以及阈值,所提出的改进型遗传算法进行了较好的优化,有效避免 BP 神经网络对结构参数盲目选择带来的问题等。

参考文献

[1] 高殿滢,王开宇,刘佳鑫,等. 小电流接地系统谐振过电压的原因分析及防治措施[J]. 东北电力技术,2014,35(12):47-50.

[2] 高殿滢,李胜川,刘佳鑫. 一起 500kV 线路电压异常现象的事故分析处理[J]. 东北电力技术,2015,36(1):1-5.

[3] 张大宁,刘冉,蔡静,等. 变电站接地网缺陷诊断系统[J]. 东北电力技术,2014,35(2):54-57.

[4] 金英. 城市电网 35 kV 系统单相接地故障分析[J]. 东北电力技术,2013(2):32-36.

[5] 周永勇,周淦,杨柱石,等. 采用 CWP-EM 和 IPSO-WNN 的配电网单相接地故障定位[J]. 高电压技术,2010,36(4):873-877.

[6] 郭三中. 基于小波神经网络的配电网故障定位研究[J]. 自动化应用,2010(12):27-30.

[7] 惠学军. 基于小波神经网络的小电流接地系统单相接地故障定位研究[D]南京:河海大学,2002.

[8] 李振然,贾旭彩,李滨. 基于小波变换与 BP 神经网络相结合的配电网单相接地故障定位方法[J]. 继电器,2004(9):24-26.

[9] 黄琼. 基于小波神经网络的配电网单相接地故障定位研究[D]. 南昌:南昌大学,2013.

[10] 杨柱石,周淦,卢毅,等. 基于 IMF-EM 和 IPSO-WNN 的配电网单相接地故障定位[C]. 重庆市电机工程学会 2010 年学术会议论文集,2010.

[11] 张钧. 配电网智能故障诊断与谐波源定位研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[12] 唐金锐. 电力线路在线巡视监测及故障精确定位的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.

[13] 彭基伟,吕文华,行鸿彦,等. 基于改进 GA-BP 神经网络的湿度传感器的温度补偿[J]. 仪器仪表学报,2013(1):153-160.

[14] 温文. 基于改进 BP 神经网络的产品质量合格率预测研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

[15] 曹步清. 基于 GA 进化 BP 神经网络的货币识别研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

[16] 董升伟. 基于改进 BP 神经网络的轨道交通短时客流预测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.

作者简介:

朱雁斌(1985),工程师,从事电力系统变电、配电生产技术管理工作。

(收稿日期:2015-11-26)

分区电网结构对受电极限的影响分析

赵 瑞¹,张再驰¹,王 卫¹,彭 龙²,潘 艳²,郭秋婷²

(1. 国网北京市电力公司,北京 100220;2. 南京南瑞集团公司北京监控技术中心,北京 100220)

摘 要:受端电网不同分区结构对其受限方式影响较大。比较了分区的两种受限方式热稳定极限和静态电压稳定极限,得到了受限方式随分区结构的变化规律。结合实际分区电网的特点,对分区网络进行合理简化,采用阻抗模指标计算出静态电压稳定极限,与分区变压器制约下的热稳极限对比得出分区受限方式,分析了线路长度、变电站容量、负荷功率因数和分区内部电源接入情况对受限方式的影响。根据实际电网仿真验证了分析过程和规律的正确性,可为电网分区规划运行提供一定的技术参考。

关键词:静态电压稳定;受电极限;分区电网;热稳定极限

Abstract:The different district structures of receiving - end grid have a great influence on its constrained modes. The thermal stability limit and static voltage stability limit of two constrained modes are compared, and the variation of constrained modes along with the district structures is obtained. Combined with the characteristics of an actual district grid, the district grid is simplified reasonably. The static voltage stability limit is calculated using impedance module indicator, and then is compared with the thermal stability limit controlled by district transformer to get the constrained modes. The influences of line length, substation capacity, load power factor and district internal power supply access on the constrained modes are analyzed. Based on the simulation of an actual power grid, the correctness of analysis process and rules is verified, which can provide a technical reference for the district planning of grid operation.

Key words:static voltage stability; power - receiving limit; district grid; thermal stability limit

中图分类号:TM71 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)02 - 0049 - 05

0 引 言

分层分区运行方式下的大型受端电网中,电压稳定将成为限制电网安全稳定运行的关键因素,同时受电极限也受分区变压器热稳制约^[1-3]。研究分区电网不同网架结构下受限方式,有针对性制定措施对提高受电极限有实际意义。

热稳定主要考虑变压器 $N-1$ 后决定分区受电极限,不同网络结构主要体现在分区变压器台数和功率分配上。静态电压稳定限制下的分区受电极限影响因素较多,目前电网多采用分层分区的运行方式,分区内部 500 kV 主网中的关键设备、输送通道或者分区内大电源停运都将给相关 220 kV 分区电网的电压稳定性带来较大程度的威胁^[4-5]。目前电力系统电压稳定问题的研究方法主要有静态和动态分析方法,动态分析结果较为精确,但计算时间

长^[6-7]。静态稳定分析方法计算量小,在一定程度上能够较好地反映系统的电压水平,因此得到广泛的应用。文献[8-9]总结各种静态电压稳定指标的优缺点和适用条件,文献[10]研究了不同模型对静态电压稳定裕度的影响。考虑到实际电网,文献[11]结合不同分区电网的特点,仿真分析了影响分区电压稳定极限的各个因素,但其并没有分析电网结构对电压稳定极限的影响。综上所述,如何结合实际电网结构,合理地建立分区模型,分析影响分区受电极限的关键因素具有实际意义。

通过对实际电网分析,考虑主要元件对分区电网进行合理简化,运用阻抗模指标求解静态电压稳定极限,并结合分区热稳定,给出不同网络结构下分区受限方式,并给出了受限方式与分区主变数量之间的变化规律,可为电网分区规划运行提供一定的技术参考。

1 电压稳定极限理论计算方法

系统的等值模型如图 1 所示,设网络等值阻抗为 $Z_s = Z_s \angle \beta - R + jX$, 负荷阻抗为 $Z_L = Z_L \angle \theta$ 。

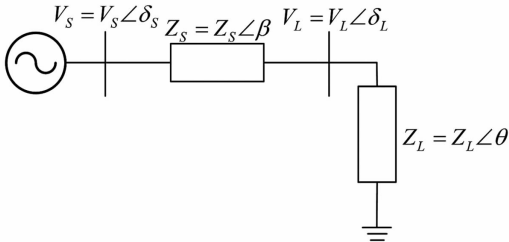


图 1 系统等值图

则负荷功率为

$$P_L = \frac{V_s^2 Z_L \cos \theta}{(Z_s \cos \beta + Z_L \cos \theta)^2 + (Z_s \sin \beta + Z_L \sin \theta)^2}$$

式中: V_s 为电源电压; θ 为给定负荷功率因数。负荷吸收最大功率时满足

$$\frac{\partial P_L}{\partial Z_L} = 0 \tag{1}$$

求解为

$$Z_L = Z_s \tag{2}$$

通过式(2)可知,当负荷阻抗和线路阻抗模值相等时,负荷吸收功率达到极限。此时功率最大值为

$$P_L^{\max} = \frac{V_s^2 \cos \theta}{2Z_s [1 + \cos(\beta - \theta)]} \tag{3}$$

若忽略线路电阻,系统侧电压取 1, 则

$$P_L^{\max} = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \times \frac{1}{2X} \tag{4}$$

2 分区电网电压稳定极限计算

2.1 分区模型建立

分区电网由 500 kV 变电站、分区内部电源和分区电网结构组成,如何将复杂的分区网络合理简化对于分区静态电压稳定极限的分析计算起关键作用。

这里建立了分区模型,如图 2 所示。一个 500 kV 变电站经过 220 kV 线路与分区内部电源经过 220 kV 线路并联,再通过 220 kV/110 kV 变压器与负荷相连。

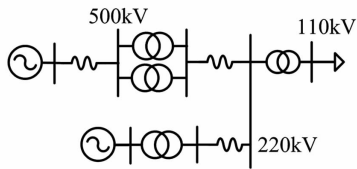


图 2 系统模型

上述系统等值的电路如图 3 所示,图中 V_{s1} 和 V_{s2} 分别为分区外系统等值电源的电压和分区内电源机端等值电压,取幅值为 1, 则两处电源等效合并在一起,如图 4 所示。

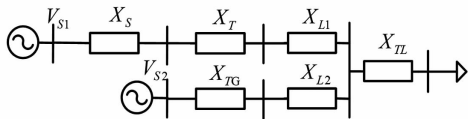


图 3 等值电路模型

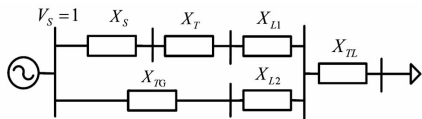


图 4 等值电路模型

图中: X_s 为 500 kV 变压器外部系统等值电抗; X_T 为分区变压器等值电抗,取值为分区所有 500 kV 变压器的并联电抗; X_{L1} 为 500 kV 变压器到负荷侧 220 kV 变压器之间线路等值电抗,负荷一般通过 2 ~ 3 段线路与 500 kV 变压器低压侧相连,选取线路长度的平均值的 2 倍作为其等效距离; X_{L2} 为分区内电源到负荷侧 220 kV 变压器线路等值电抗。与分区变压器相比,分区内部电源和负荷之间的距离较近,且通常一个电源功率输送给周边多个负荷,因此其等效的电气距离较短,选取其等效距离为 X_{L1} 的 1/2, T_{TG} 为分区内电源升压变压器等值电抗,根据分区内电源容量确定。

设分区发电量为 S_G , 负荷为 P_L , 忽略损耗,以变压器 $N-1$ 后变压器满载时的负荷量确定 220 kV/110 kV 变压器容量时有

$$P_L = S_G + (N-1)S_N \tag{5}$$

因此图中各参数为

$$X_s = \frac{1}{I_s}$$

$$X_T = U_{KT} \% \times \frac{S_B}{(N-1)S_N}$$

$$X_{L1} = X_L \times L1$$

$$X_{L2} = X_L \times L2$$

$$X_{TL} = U_{kL} \% \times \frac{S_B}{P_L}$$
$$X_{TG} = U_{kG} \% \times \frac{S_B}{S_G} \tag{6}$$

式中： I_S 为 500 kV 变压器高压侧三相短路电流标么值； X_L 为每公里电抗标么值； $L1$ 和 $L2$ 分别对应相应线路阻抗长度； $U_{kT} \%$ 、 $U_{kG} \%$ 和 $U_{kL} \%$ 分别为 500 kV 变压器、分区内部电源升压变压器和负荷侧变压器的短路电压百分比。设线路热稳为 P_t ，则单台 500 kV 变压器 220 kV 线路出线回数 N_{L1} 按式 $N_{L1} \geq \frac{S_N}{P_t}$ (N_{L1} 取其范围内最大整数) 确定；分区内电源变压器台数 N_G 通过式 $N_G \geq \frac{S_G}{S_n}$ (N_G 取其范围内最大整数) 确定；分区内部电源变压器出线回数按式 $N_{L2} \geq \frac{S_N}{P_t}$ (N_{L2} 取其范围内最大整数) 确定；考虑负荷功率因数为 θ ，则负荷侧外的系统等值电抗 X 为

$$X = (X_S + X_T + X_{L1}) // (X_{TG} + X_{L2}) + X_{TL} \tag{7}$$

因此可得负荷极限为

$$P_L^{\max} = \frac{\cos\theta}{1 + \sin\theta} \cdot \frac{1}{2[(X_S + X_T + X_{L1}) // (X_{TG} + X_{L2}) + X_{TL}]} \tag{8}$$

2.2 模型验证

选取北京电网验证模型的准确性，北京电网包括 6 个分区，分区变压器台数 3 ~ 6 台，负荷功率因数 0.98，仿真选择负荷按固定功率因数增长方式，负荷为恒功率模型。取电网典型参数 $S_B = 1\,000$ MVA， $U_B = 525$ kV，系统侧短路电流 $I_S = 50$ kA，因此可得 $X_S = 0.02$ 。500 kV 变压器、分区内部电源升压变压器选择 $U_k \% = 0.15$ ，负荷侧变压器的 $U_k \% = 0.12$ ， $X_L = 0.006$ p. u./km，负荷侧变压器容量 $S_n = 300$ MVA，每条线路热稳极限为 300 MW，北京电网线路平均长度 10 km， $L1$ 取 20 km， $L2$ 取 10 km，因此可根据不同分区发电量和负荷量计算静态电压稳定极限。计算朝顺通分区正常方式下、安兴分区在兴都 1 号变压器检修方式下、昌城分区海淀 2 号变压器检修方式下、通安分区新通 2 号变压器检修方式下和兴房门分区门头 2 号变压器检修方式下的静态电压稳定极限，理论计算和仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可知，理论模型和实际仿真间误差在 10% 以内，满足工程计算的要求。此外，分区等值模型为单通道结构，朝顺通分区正常运行方式下其结构为 3 个变电站带一片负荷区域，其误差为 1.3%，

因此可知对于静态电压稳定极限计算而言，分区由多通道供电的结构并不会增大等值模型的误差。

表 1 理论和仿真计算对比/MW

分区	计算方式	理论计算	仿真计算	误差
朝顺通	正常方式	3 950	3 900	1.3%
安兴	兴都 1 号变压器检修	2 038	1 860	9.2%
昌城	海淀 2 号变压器检修	2 390	2 300	3.9%
兴房门	门头 2 号变压器检修	3 100	3 400	8.8%

2.3 电压稳定约束下的受电极限

通过上述模型可知，由电压稳定约束下的下网极限 $P_{\max}$ 为

$$P_{\max} = P_L^{\max} - P_G$$

首先分析分区发电量对其影响，图 5 为负荷极限和分区下网极限随分区发电量的变化曲线。由图中可知随着分区发电量的增加负荷极限增加，但是下网极限却随之而降低，因此可知在其他网络不变的情况下，分区电源的增多并不能增加分区的下网极限。

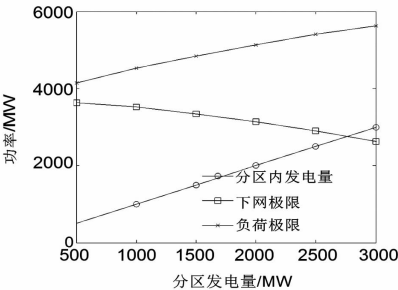


图 5 分区受电极限分析

3 分区受限方式分析

分区受电极限同时受到变压器容量制约，分区电网负荷由 500 kV 主变压器和接入 220 kV 分区电网的地方电源共同供电。分区电网受电极限取决于 500 kV 变电站的配置情况、分区电网的电源容量、分区电网结构。假设同一变电站只配置同类型的变压器，分区受电极限考虑 500 kV 主变压器 $N - 1$ 后其余主变压器过载 30% 情况，则受变压器容量制约下的受电极限为

$$P = 1.3 S_N \times (N - 1) \tag{9}$$

式中： S_N 为 500 kV 变压器容量； N 为分区主变压器台数。在不同的变压器台数下计算静态电压稳定极限，与此台数下的热稳极限对比，可以得出分区的受

电的受限方式;考虑到不同线路长度、变压器容量、负荷功率因数和分区内部电源接入容量影响因数,得到了不同网络结构下受限方式与变压器台数之间的关系。

3.1 线路长度对受电极限的影响

取变压器容量 1 200 MVA,功率因数为 0.98,考虑线路不同长度 10 km、20 km、30 km、40 km,分区发电为 0,根据上述公式计算出不同变压器台数下的热稳定极限和静态电压稳定极限,结果如表 2 所示。

表 2 不同线路长度下热稳和静态电压稳定极限

变压器台数	热稳极限 /MW	电压稳定制约的下网极限/MW			
		10 km	20 km	30 km	40 km
2	1 560	1 946	1 816	1 703	1 603
3	3 120	3 554	3 336	3 144	2 972
4	4 680	4 904	4 627	4 379	4 156
5	6 240	6 054	5 736	5 449	5 190
6	7 800	7 046	6 700	6 386	6 100
7	9 360	7 910	7 545	7 212	6 907

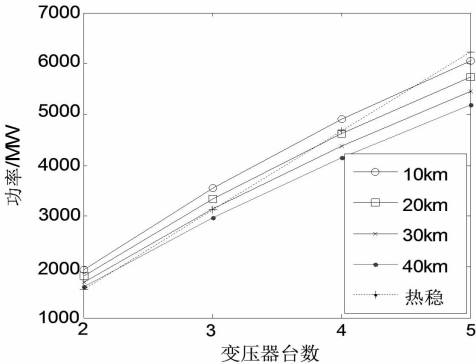


图 6 不同线路长度下的受电极限

由表 2 和图 6 可知,变压器台数增加、线路变短,等值阻抗都减少,下网极限增加。当分区等值线路长度为 10 km 时,分区变压器台数超过 4 台,则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 20 km 时,分区变压器超过 3 台,则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 30 km 时,分区变压器超过 3 台,则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 40 km 时,分区变压器超过 2 台,则分区受静态电压稳定限制,若考虑串联电抗器,可在相应长度中减去。

3.2 变压器容量对受电极限的影响

取线路长度 20 km,功率因数为 0.98,考虑变压器容量 750 MVA、1 000 MVA、1 200 MVA,分区发电量设为 0,得到不同变压器容量下分区受限方式与变压器台数之间的关系。

表 3 750 MVA 下受限方式对比

变压器台数	热稳极限/MW	下网极限/MW
2	975	1 251
3	1 950	2 221
4	2 925	3 226
5	3 900	4 007
6	4 875	4 830
7	5 850	5 473

表 4 1 000 MVA 受限方式对比

变压器台数	热稳极限/MW	下网极限/MW
2	1 300	1 635
3	2 600	2 904
4	3 900	4 007
5	5 200	5 086
6	6 500	5 938
7	7 800	6 700

表 5 受限方式变化的临界变压器台数

变压器容量/MVA	变压器台数
750	6
1 000	4
1 200	3

由表 3 ~ 表 5 可知,随着变压器容量的增加,出现静态电压稳定问题对应的变压器台数下降。变压器容量为 750 MVA 时,变压器台数多于 6 台时,分区受限方式为电压稳定。变压器容量为 1 000 MVA 时,变压器台数多于 4 台时,分区受限方式为电压稳定,容量为 1 200 MVA 时,分区变压器台数多于 3 台时,分区受限方式为电压稳定。

3.3 负荷功率因数对受电极限的影响

线路长度 20 km,变压器容量为 1 200 MVA,分别取负荷功率因数为 0.97、0.95、0.9 和 0.8,分区发电量设为 0,计算热稳极限和静态电压稳定极限结果如表 6 所示。图 7 为两种极限随变压器台数变化的对比图。

表 6 不同功率因数下热稳极限和静态电压稳定极限

变压器台数	热稳极限 /MW	电压稳定制约的下网极限/MW			
		0.97	0.95	0.9	0.8
2	1 560	1 734	1 609	1 393	1 111
3	3 120	3 185	2 955	2 558	2 041
4	4 680	4 417	4 098	3 548	2 830
5	6 240	5 476	5 080	4 399	3 509
6	7 800	6 396	5 934	5 138	4 098
7	9 360	7 203	6 683	5 786	4 615

如图 7 可知,功率因数为 0.97 时,变压器超过 3 台,则受限方式为电压稳定。当功率因数为 0.95 时,

变压器台数超过 2 台则存在电压稳定问题。当功率因数低于 0.95 时,则分区由静态电压稳定制约。

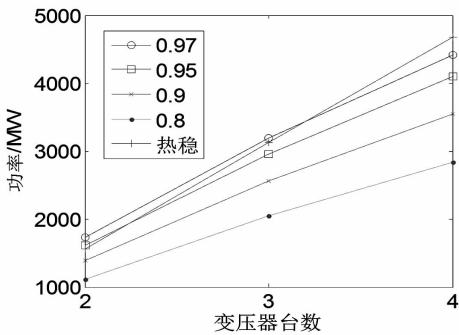


图 7 不同功率因数下受限方式对比

3.4 分区内电源对受电极限的影响

一般分区内都存在电源以提供无功支撑,计算了分区电源不同接入容量下,分区的热稳极限和静态电压稳定极限。对比得出了分区内不同发电量下受限方式和变压器台数之间的规律,如表 7 所示。

表 7 不同分区发电量下的热稳极限和电压极限对比

变压器台数	热稳极限 /MW	下网极限/MW				
		500	1 000	1 500	2 000	2 500
2	1 560	2 397	2 847	3 139	3 592	4 045
3	3 120	3 930	4 382	4 688	5 140	5 591
4	4 680	5 218	5 674	5 995	6 449	6 901
5	6 240	6 323	6 784	7 120	7 577	8 033
6	7 800	7 283	7 750	8 101	8 563	9 022
7	9 360	8 125	8 599	8 963	9 431	9 896
8	10 920	8 870	9 352	9 728	10 202	10 673

表 8 受限方式变化的临界变压器台数

分区电源 (S_g)	变压器台数
0	4
500	5
1 000	6
1 500	6
2 000	7
2 500	7

注:变压器容量 1 200 MVA

表 8 为受限方式变化的临界变压器台数。从表 8 可知,分区电源增加可以改善由静态电压稳定导致受电限制问题。此外,对于目前的受端电网负荷不断增加,同时迫于环境的压力需要减少分区内发电,则相应也需调整降低分区变压器台数,避免出现电压稳定问题。

4 结 论

对典型受端电网分区进行了建模,从理论上分析网络结构对分区静态电压稳定性的影响;在此基础上分析其与热稳定之间的关系,从而得出了分区

电网受限方式与变压器台数之间的变化规律:变压器台数较低时分区受电受热稳制约,台数较高时受静态电压稳定制约,对于不同的分区情况,对应的变压器临界台数不同。针对北京电网各分区发电量 0 ~ 2 500 MW 情况,确定其分区受限方式变化对应的变压器台数在 4 ~ 7 台之间,高于上述台数分区受电极限受静态电压稳定制约,低于上述台数分区受电极限则由变压器热稳定制约。针对具有不同结构特性的电网,上述变压器台数略有变化,应视具体情况而定,但分析方法仍然适用。

参考文献

[1] 马世英,印永华,李柏青,等.我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J].电网技术,2006,30(17):7-13.

[2] 董宸,周霞,李威,等.提升特高压电网输电能力的方法[J].江苏电机工程,2013,32(5):1-4.

[3] 李建华.含 HVDC 和 FACTS 元件的复杂电力系统小干扰稳定性分析方法[D].西安:西安交通大学,2005.

[4] CIGRE Task Force 38.02.10. Modelling of Voltage Collapse Including Dynamics Phenomena[R]. CIGRE Brochure No. 75, 1993.

[5] Canizare C. Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools[R]. [S]. I: IEEE/PES Power Systems Stability Subcommittee Special Publication, SP101PSS, 2002.

[6] Abed A M. WSCC Voltage Stability Criteria Undervoltage Load Shedding Strategy and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999(1):191-197.

[7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience[M]. IEEE/PES 90TH0358-2-PWR, 1990.

[8] Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, et al. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):387-1401.

[9] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.

[10] 杨冬,刘玉田,牛新生.电网结构对短路电流水平及受电极限的影响分析[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):62-67.

[11] 王利锋,李建华,余颖辉.分区电网电压稳定性研究[J].华东电力,2010,38(6):0853-0857.

(收稿日期:2015-12-08)

中性点不接地系统单相故障导致 TV 熔断机理分析

陆 强,滕予非,唐 明

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:35 kV 低压配电系统中性点一般采用不接地方式,当低压母线发生单相短路,在故障消失后低压母线 TV 上会产生很高的过电压,造成铁心严重饱和,进而产生很高的过电流,此电流极有可能导致 TV 熔丝熔断;针对此问题推导了单相故障消失后 TV 过电流的物理机制并提出相应的抑制措施,最后通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建了一个实际电力系统模型,验证了此物理机制并证明了抑制措施的可行性。

关键词:单相接地故障;TV 熔断;中性点不接地系统;PSCAD

Abstract:35 kV distribution network is usually an isolated neutral system, when encountered an single-phase earth fault and after the fault disappears, a high voltage will be produced on TV of low-voltage bus which makes the core saturated seriously, and then a high current will occur, so the TV fuse has a extremely high risk to be fused. Aiming at the problem, the physical mechanism of TV overcurrent after a single-phase earth fault disappears is deduced and the corresponding suppression measures are proposed. At last, the PSCAD/EMTDC software is used to establish a real power system model to test the physical mechanism, and it proves the feasibility of the proposed suppression measures.

Key words:single-phase earth fault; TV fuse; isolated neutral system; PSCAD

中图分类号:TM713 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)02-0054-05

0 引 言

2014 年的 5 月 26 日、5 月 30 日以及 7 月 1 日,四川攀枝花的 110 kV 白岩子变电站 35 kV 母线 TV 别发生了 A 相、C 相以及 B 相熔丝熔断的情况。配电系统 TV 丝熔断不仅会影响电费的计量,造成很大的损失,严重时甚至烧毁 TV^[1]。另外,高压熔断器本身的熔断也是一种损失,更换也比较麻烦。还有,当 TV 一次侧高压熔断器熔断时,可引起系统虚假接地,开口三角电压升高,引起继电器误动作,容易造成工作人员的误判,将其当成系统接地,而花费很多时间还找不到接地点。这些情况对于电力系统安全、稳定、可靠的运行都是十分不利的。因此,为保证电力系统的正常运行,电磁式 TV 压熔断器熔断^[2-3]的研究就显得非常重要^[4]。

在 10 kV、35 kV 中性点不接地配电网^[5]中,母线上安装的电磁式 TV 常采用的是 Y0/Y0 的接线方式;由于系统单相接地故障所引起的熔丝熔断问题时有发生,严重时甚至烧毁电磁式 TV^[6],对其原理的研究将有助于采取有效的措施进行抑制。

1 事件梳理

根据攀枝花 110 kV 白岩子变电站 35 kV 母线 TV 丝的多次熔断事件,利用白岩子变电站录波文件,可以对 7 月 1 日 35 kV Ⅲ母 TV B 相高压侧熔丝熔断事件进行梳理,通过对该日 19:47 至 20:42 近 1 个小时的波形进行梳理。可以得到这段时期白岩子 35 kV Ⅲ母 TV 二次侧三相电压有效值的变化趋势如图 1 所示。

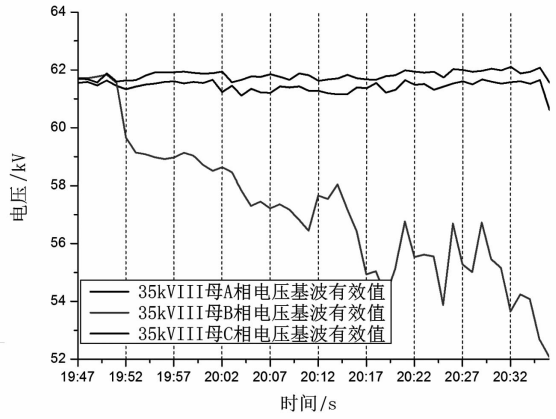


图 1 白岩子 35 kV Ⅲ母 TV 二次侧三相电压有效值变化
在 19:52 前白岩子变电站 35 kV Ⅲ母三相电压

保持基本平衡,而在 19:52 以后母线 B 相电压出现明显跌落,并在后续过程中持续下降。同时录波波形表明,母线 B 相电压畸变率也逐渐增加,三相零序电压明显上升。

图 2 所示是 7 月 1 日 23:44:49 白岩子 35 kV Ⅲ母 TV 二次侧三相电压波形,如图可知,此时 35 kV Ⅲ母 B 相电压的基波有效值已经跌落至 20 V,而 A、C 两相电压则保持正常。同时,通过录波可以发现此时 B 相电压畸变严重,三相零序电压有效值达到 25 V 以上。通过与攀枝花供电公司相关工作人员交流,认为该现象即为熔丝熔断现象。因此根据上述分析可以初步判断,7 月 1 日所发生的 110 kV 白岩子变电站 35 kV Ⅲ母 TV B 相熔丝熔断发生的初始时刻即为 19:52。

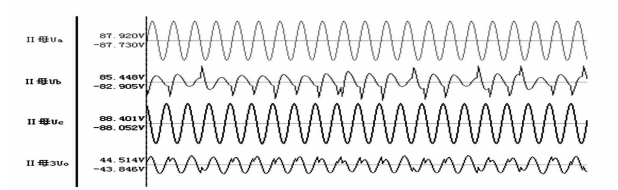


图 2 23:44:49 白岩子 35 kV Ⅲ母 TV 二次侧三相电压波形

2014 年 7 月 1 日 19:52:03 开始记录的白岩子 35 kV 母线电压波形如图 3 所示。

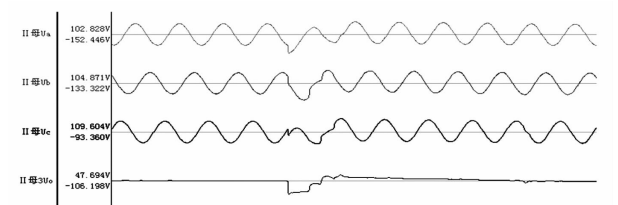


图 3 白岩子 35 kV Ⅲ母 TV 二次侧三相电压波形

由图 3 可知,19:52:03:847 白岩子 35 kV 侧网络出现了一次短时的 C 相接地故障,持续时间约为 8 ms。故障期间 C 相电压有明显下跌,而 A、B 两相电压则有明显的升高。故障发生前后,35 kV Ⅲ母 TV 的 B 相电压有效值从 61.572 V 下降至 59.67 V。综合图 1 与图 3 可以初步判断,19:52:03 在白岩子 35 kV 侧网络上所发生的 C 相接地故障,是导致 35 kV Ⅲ母 TV B 相高压侧熔丝熔断的直接原因。

2 熔断机理分析

经过分析,初步认为白岩子变电站 7 月 1 日 35 kV TV 高压侧熔丝熔断事件是由低压侧单相接地短

路故障消失后导致的,下面分析其机理。

对于中性点不接地系统,当一相接地时,另两相电压升高到线电压,它们的对地电容上也就充上了和线电压相适应的电荷。然而,当接地故障消失后,为了保持系统平衡,各相对地电压则力图恢复到正常运行的相电压的水平。在此过程中,故障期间在非故障相上所积累的电荷则需要一个释放的过程,即需要找到出路泄往大地。然而,由于系统中没有其他的泄流通路,自由电荷只好通过互感器的一次绕组泄往大地。在此过程中,极有可能引起 TV 铁心的饱和。具有过饱和和铁心的电压互感器,在工频电源电压作用下也将出现很大的冲击电流。泄流电流与工频冲击电流共同作用,则可能造成熔断器熔断。

下面对其熔断原因进行数学方面的分析,此处采用注入虚拟补偿电量法^[7]对此问题进行分析。注入虚拟补偿电量计算方法的主要思路是:对于一个给定的电路,开关的通断操作认为是由两个等效过程叠加而成的,通断操作前电路中的稳态过程与由通断操作所引起的暂态过程“在开关的通断操作过程中,接通时电路会有回路电流出现,分断时断口两端会有端电压出现”,利用叠加原理,可以表达为

$$\begin{aligned} i &= \bar{i} + \tilde{i} \\ u &= \bar{u} + \tilde{u} \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $\bar{i}$ 、 $\bar{u}$ 为通断操作前的回路电流与电压; $\tilde{i}$ 、 $\tilde{u}$ 为通断过程引起的暂态电流和暂态电压; i 、 u 为通断过程的合成电流与合成电压。

为此,将 3TV 接法时的单相接地故障等效电路看作是电路图 4 与图 5 的叠加,其中图 4 所示电路相当于接地短路还在持续的工作状态,即单相接地故障的稳态等效电路。图 5 所示电路则相当于接地故障消除后的等效电路,由虚拟补偿电量法可知,接地故障的消除就相当在接地点又并接一个与原电流 I_{d0} 方向相反的电流源。

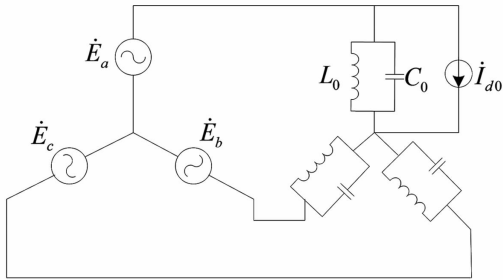


图 4 单相接地故障等效的稳态图

由图 4 设 A 相金属接地,忽略相间电容影响,戴维南等效图可求出单相故障时的稳态短路电流为

$$\dot{I}_{d0} = \left(\frac{\dot{E}_a}{1/j3\omega C_0} + \frac{\dot{E}_a}{j\omega L_0/3} \right) = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3j\dot{E}_a \tag{2}$$

式中: L_0 为 TV 各相电感值; C_0 为各相对地电容。

$$\begin{aligned} \text{由电源 } \dot{E}_a \text{ 的瞬时值} \\ e_a = E_m \sin(\omega t + \varphi) \\ \text{可得短路电流的瞬时值为} \\ i_{d0} = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3jE_m \sin(\omega t + \varphi) \\ = I_m \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ) \end{aligned}$$

式中, $I_m = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3E_m$

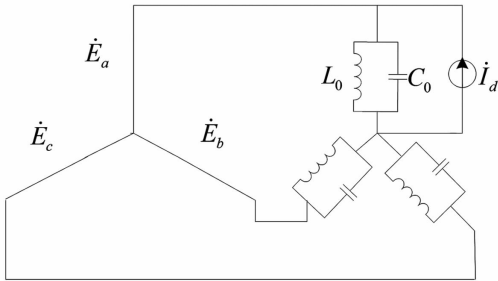


图 5 单相接地故障消除后的等效的暂态电路图

再根据图 5,可以推导当单相故障消失后,并考虑衰减因数的影响,可得此时加在 TV 两高压绕组两端的电压为

$$\begin{aligned} U(t) &= E_m \sin(\omega t + \varphi) - E_m e^{-\delta t} (\cos\varphi \sin\omega t + \\ &\quad E_m' \frac{\omega'}{\omega} \sin\varphi \cos\omega' t) \\ &= E_m \sin(\omega t + \varphi) - E_m \sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi} \\ &\quad \times e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \varphi') \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \varphi' &= \cos^{-1} \frac{\cos\varphi}{\sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi}} \\ \omega' &= 1/ \sqrt{L_0 C_0} \end{aligned}$$

等式(3)中第一项为电压的强制分量,它是不衰减的,而后一项则为电压的自由分量,是振荡衰减的,并且其幅值是初相角 φ 的函数,通常系统的 $\omega' < \omega$ 。

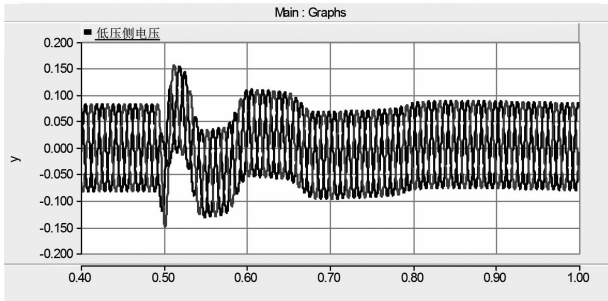
由于在高压绕组中出现频率为 ω' 的电压自由振荡分量,则在铁心中同样会有相同频率的自由振荡磁通,绕组中就会出现相应的自由振荡磁链 Φ 。由磁链关系 $U(\Phi) = d\Phi/dt$ 可得

$$\Phi = \int U dt = \frac{E_m}{\delta^2 + \omega'^2} \sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi} \sin(\omega' t + \varphi' + \alpha) \tag{4}$$

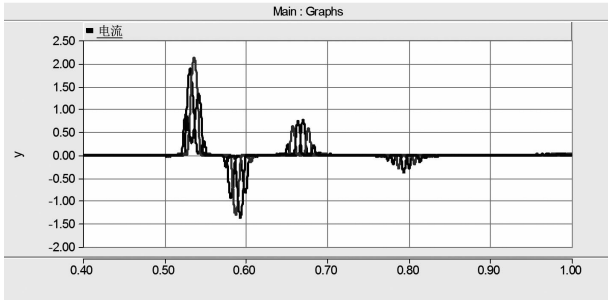
由式(4)可知其幅值 $|\Phi|$ 与初相角 φ 及 ω' 均有关系。馈线越长,对应的零序 C_0 越大,自由振荡频率 ω' 越小,但对应的 $|\Phi|$ 越大。在此振荡的作用下,互感器铁心半个周期将出现一次饱和,每次饱和和相应的对应一次 ω' 频率的冲击电流,此冲击电流很有可能导致 TV 熔断。

3 仿真分析

利用 PSCAD 搭建白岩子变电站 35 kV 电网的电磁暂态示意模型。设置 $t = 0.5$ s 时,35 kV 网络内 C 相出现短时单相接地故障,持续时间 8 ms,接地阻抗 1 000 Ω 。由此,可以得到在熔丝不熔断的情况下,白岩子站 35 kV 母线 TV 二次侧电压与高压侧电流如图 6 所示。



(a) 白岩子站35kV母线TV二次侧电压



(b) 白岩子站35kV母线TV高压侧电流

图 6 仿真结果

由图 6 可知,在 C 相单相短路结束后,白岩子 35 kV 母线上出现了一个低频的自由衰减分量,该分量导致 TV 出现饱和。仿真表明,该工况下 35 kV TV 高压侧电流达到 2.0 A,超过了熔丝的额定电流 0.5 A,熔丝熔断概率较高。

对于中性点不接地系统,当一相接地时,正常相

电压将升高到线电压。当接地故障消失后,为了保持系统平衡,各相对地电压则力图恢复到正常运行的相电压的水平。在此过程中,正常相则会出现电荷释放的物理过程。由于中性点不接地系统中没有其他的泄流通路,自由电荷仅能通过互感器的一次绕组泄往大地。由于自由电荷释放过程的振荡频率偏低,因此在释放过程中极有可能引起 TV 铁心的饱和。具有过饱和铁心的电压互感器,在工频电源电压作用下也将出现很大的冲击电流。泄流电流与工频冲击电流共同作用,则可能造成熔断器熔断。

4 抑制措施

前面的分析表明,攀枝花变电站 35 kV TV 高压侧熔丝熔断可能是由于 35 kV 电网出现单相短路后,正常相的电压在从线电压恢复到相电压的过程中,自由电荷经 TV 高压侧绕组释放并导致 TV 铁心饱和所造成的。根据这一机理,可提出以下两条抑制方法建议:

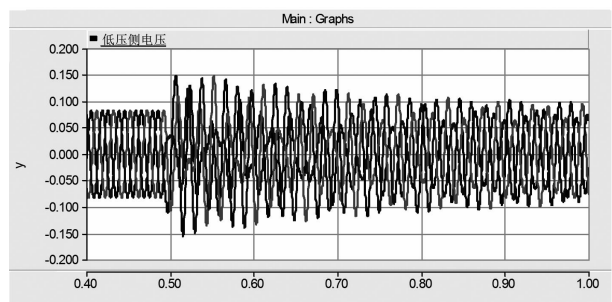
1) 变压器中性点加装消弧线圈

当在变压器中性点加装消弧线圈后,在 35 kV 电网单相故障恢复期间,自由电荷将增加一条释放通道,流经 TV 铁心的自由电荷将明显减小,铁心饱和将得以抑制。因此,利用在变压器中性点加装消弧线圈^[8]可以有效地抑制 35 kV TV 高压侧熔丝的熔断问题。

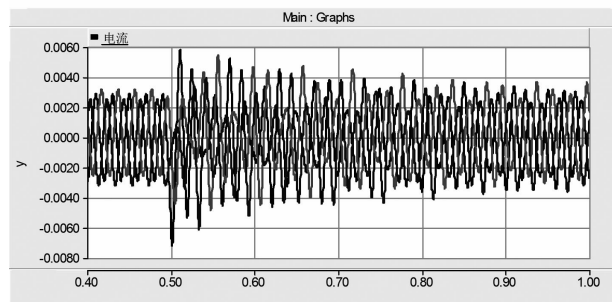
同样利用 PSCAD 仿真软件,对白岩子变电站 35 kV 电网的电磁暂态进行仿真。与前面的仿真工况不同的是,前面模型中在白岩子主变压器 35 kV 侧中性点装设了消弧线圈,而此处则在主变压器 35 kV 侧中性点装设了消弧线圈,线圈电感值刚好实现 35 kV 电网过补偿。依然设置 $t = 0.5\text{ s}$ 时,35 kV 网络内 C 相出现短时单相接地故障,持续时间 8 ms,接地阻抗 1 000 Ω 。可以得到在熔丝不熔断的情况下,白岩子站 35 kV 母线 TV 二次侧电压与高压侧电流如图 7 所示。

对比图 6 与图 7 可知,系统装设消弧线圈后,由于 C 相单相短路消失后,在 35 kV TV 高压侧产生的电流由 2.0 A 下降至 0.007 A,大幅度地降低了 TV 熔丝熔断的可能性。由此,验证了消弧线圈可以有效抑制 TV 高压侧熔丝熔断的结论。

2) 扰动原因排查



(a) 白岩子站35kV母线TV二次侧电压



(b) 白岩子站35kV母线TV高压侧电流

图 7 装设消弧线圈后的仿真结果

由于 TV 高压侧熔丝熔断原因是由于低压侧电网单相短路等扰动造成的,因此,消除扰动则可以在根本上解决 TV 高压侧熔丝熔断的原因。

因此建议,国网攀枝花供电公司对 35 kV、10 kV 电网的绝缘情况进行排查,重点梳理在风偏情况下非绝缘架空线路与周边树木的距离;同时关注雷击、冲击负荷等因素对低压电网电压扰动的影响。

5 结 论

通过对 110 kV 白岩子变电站 7 月 1 日 35 kV TV 高压侧熔丝熔断事件进行分析,得到如下结论:通过录波数据,推断导致 35 kV TV 高压熔断的原因为单相接地短路消失产生在 TV 上的冲击电流。

1) 推导了中性点不接地系统单相短路消失后流过 TV 一次侧的电流值以及磁链的大小,并解释了导致 TV 熔断的原因;

2) 通过算例仿真分析了单相短路接地消失后导致 TV 一次侧电流值增大的现象;

3) 分析了抑制中性点不接地系统单相短路故障消失后 TV 的过流措施,并通过仿真进行了验证。

参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水力电力出版社,1985:253-294.

[2] N. Berbic, A. Nuhanovic, V. Madzarevic. Analysis of the Insulated Powergrid Transient Behavior after Faulted Phase Tripping[C]. IEEE MELECON 2004:106 – 109

[3] Yunge Li, Wei Shi, Rui Qin, et al. A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral – grounded Substations[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2003, 18(3):1009 – 1014.

[4] 王季梅. 高压交流熔断器[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000:60 – 85.

[5] 韩涛. 电磁式 PT 一次侧熔断器熔断原因分析及防治措施的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.

[6] J. Tanggawelu, B. Mukerjee, R. N. Ariffin. Ferroresonance

Studies in Malaysian Utility’s Distribution Network[C]. Power Engineering Society General Meeting, 2003:125 – 128.

[7] 许颖. 电力网中性点接地问题[J]. 电网技术, 1991, 15(3):90 – 93.

[8] E. 斯拉麦卡, W. 瓦特西(西德). 高低压电网中的暂态过程计算原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 11 – 20.

作者简介:
陆 强(1988), 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2015 – 12 – 04)

(上接第 19 页)

6 结 论

以光伏发电系统工程应用需求出发, 建立了光伏电池阵列详细数学模型, 对光伏电池板特性进行了深入研究, 并建立了直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路电磁暂态数学模型。对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统运行功能进行了稳态和动态过程分析, 采用 Matlab/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

参考文献

[1] Kadri R, Gaubert J P, Champenois G. An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid – connected Inverter Based on Voltage – oriented Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):66 – 75.

[2] 张艳霞, 李璇, 赵杰. 光伏电源最大功率跟踪的改进扰动观察法[J]. 天津理工大学学报, 2013, 29(1):21 – 24.

[3] 郑颖楠, 王俊平, 张霞. 基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2):111 – 118.

[4] Tat L N, Kay – Soon L. A Global Maximum Power Point tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10):3456 – 3467.

[5] 王晓, 罗安, 邓才波, 等. 基于光伏并网的电能质量控制系统[J]. 电网技术, 2012, 36(4):68 – 73.

[6] 孙兴, 张崇巍, 孙本新. 采用电流寻优的 MPPT 光伏阵列并网逆变器的研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3):306 – 310.

[7] 钱军, 陶梅玉, 孙智一, 等. 光伏电站接入电网对电力系

统电压闪变的影响[J]. 低压电器, 2011(22):19 – 22.

[8] 陈四雄, 曾春保. 兆瓦级光伏并网逆变器关键设计技术[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4):64 – 66.

[9] Widen J, Wackelgard E, et al. Impacts of Distributed Photovoltaics on Network Voltages: Stochastic Simulations of Three Swedish Low – voltage Distribution Grids[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12):1562 – 1571.

[10] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11):50 – 56.

[11] Villalva M G, Siqueira T D, Ruppert E. Voltage Regulation of Photovoltaic Arrays: Small – signal Analysis and Control Design[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(6):869 – 880.

[12] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kW_p 并网光伏示范电站系统设计与运行数据分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2):146 – 151.

[13] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1265 – 1271.

[14] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9):214 – 223.

[15] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3):241 – 278.

[16] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24):44 – 49.

[17] Varma R, Salama M. Large – scale Photovoltaic Solar Power Integration in Transmission and Distribution Networks[C]// Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, 2011.

(收稿日期: 2015 – 12 – 14)

封闭式绝缘管母线典型缺陷研究

刘 君¹, 胡 琳¹, 刘翔宇¹, 干建伟¹, 沈文洋²

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 湖北兴和电力新材料股份有限公司, 湖北 黄冈 438001)

摘 要:为提高封闭式绝缘管母线运行可靠性,更有效地对其开展技术监督,开展封闭式绝缘管母线典型缺陷研究。根据聚四氟乙烯绕包成型封闭式绝缘管母线实际物理结构,建立 JMAG 电磁场仿真模型,设立层间逐层短路、受潮、气隙等不同典型缺陷,分析其电势、电场分布,并通过电容量及介损试验,研究其物理表征。

关键词:管母线;缺陷;仿真;试验

Abstract:In order to improve the operation reliability of enclosed insulated pipe bus and carry out more effective technical supervision, the study on typical defects of enclosed insulated pipe bus is carried out. According to the actual physical structure of enclosed insulated pipe bus winded by PTFE, the JMAG electromagnetic field simulation model is established. In the model, the different typical defects such as short circuit, moisture and air gap are built layer by layer, and their electric potential and electric field distribution are analyzed. The physical characterization is also studied through the tests of capacitance and dielectric loss.

Key words:pipe bus; defect; simulation; test

中图分类号:TM642⁺.6 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)02-0059-05

0 引 言

封闭式绝缘管母线由于其载流量大、集肤效应低、允许应力大、整体绝缘便于设计和安装,在变电站增容改造及新型紧凑型变电站中逐步使用^[1-2]。封闭式绝缘管母线作为主变压器和用户母线的重要联结导体,直接影响着系统运行的稳定性及供电可靠性。封闭式绝缘管母线的全绝缘性能在一定程度上能避免变压器低压侧由于小动物、污秽、凝露等引起的近区短路,但由于当前封闭式绝缘管母线在我国的应用还处于初始阶段,质量监管未成体系,运行经验不足,因封闭式绝缘管母线受潮、放电、击穿等缺陷造成的停电事故时有发生^[3-4]。因此,封闭式绝缘管母线绝缘结构的理论研究还需深入,对其监督方法还需要大量的积累和验证^[5]。针对一种聚四氟乙烯绕包成型封闭式管母线为标本,建立 JMAG 电磁场仿真模型,设立层间逐层短路、受潮、气隙等不同典型缺陷,分析其电势、电场分布,并通过电容量及介损试验,研究其物理表征,力图找到能有效反映封闭式绝缘管母线典型缺陷的技术监督方法。

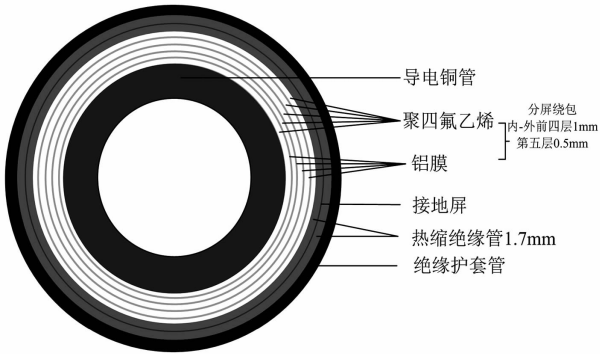


图 1 聚四氟乙烯绕包成型封闭式绝缘管
母线物理结构

1 物理模型

聚四氟乙烯绕包成型封闭式绝缘管母线物理结构如图 1 所示,导电铜管为与高压设备直接连接部分,为高电位,通过聚四氟乙烯与铝膜组成串联电容的分屏降压,直至接地屏接地。为了便于说明,电缆从内到外分别称为导电铜层、聚四氟乙烯 1 层、铝膜 1 层、聚四氟乙烯 2 层、铝膜 2 层、聚四氟乙烯 3 层、铝膜 3 层、聚四氟乙烯 4 层、铝膜 4 层、聚四氟乙烯 5 层、热缩管 1 层、接地屏蔽层、热缩管层、绝缘护

套层。

利用 JMAG 电磁场仿真软件,建立封闭式绝缘管母线 JMAG 仿真模型,如图 2 所示。对封闭式绝缘管母线的电势、电场进行分析。

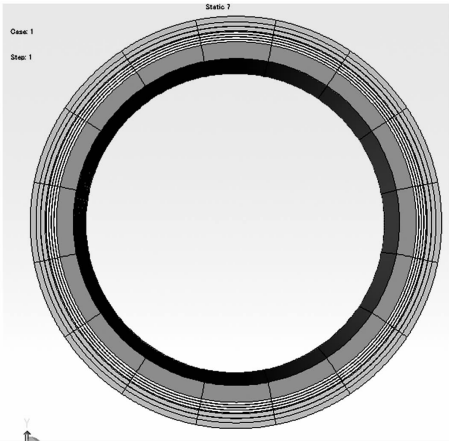


图 2 封闭式绝缘管母线 JMAG 仿真模型

2 仿真试验

2.1 绝缘逐层击穿

由于封闭式绝缘管母线在安装过程中,极易对最外层绝缘造成机械损伤;同时,长时间运行后,特别是户外运行,极易造成最外层绝缘的老化;因此,模拟封闭式绝缘管母线从最外层绝缘逐层向内击穿

的物理过程,进行仿真及试验。

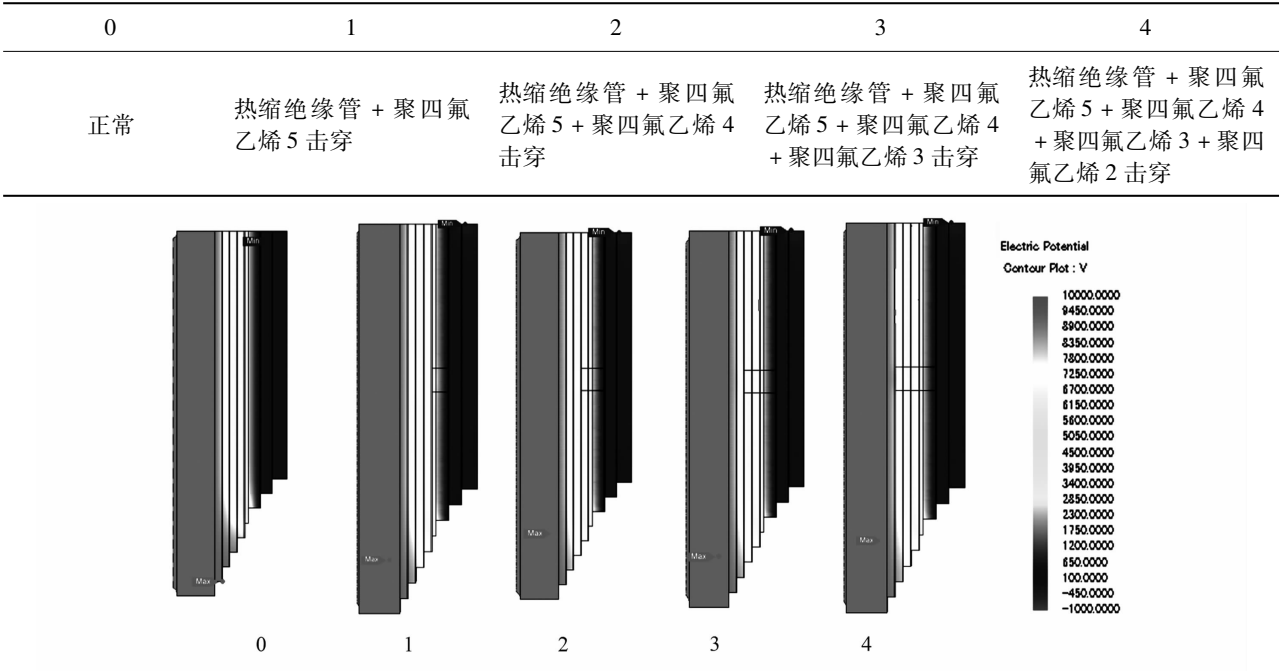
设计封闭式绝缘管母线绝缘击穿后碳层的电阻率为 $2 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$,击穿碳层设置直径为 3 mm 的圆柱形。

分别仿真了如表 1 所示的 5 种情况,JMAG 仿真结果如图 3 所示。

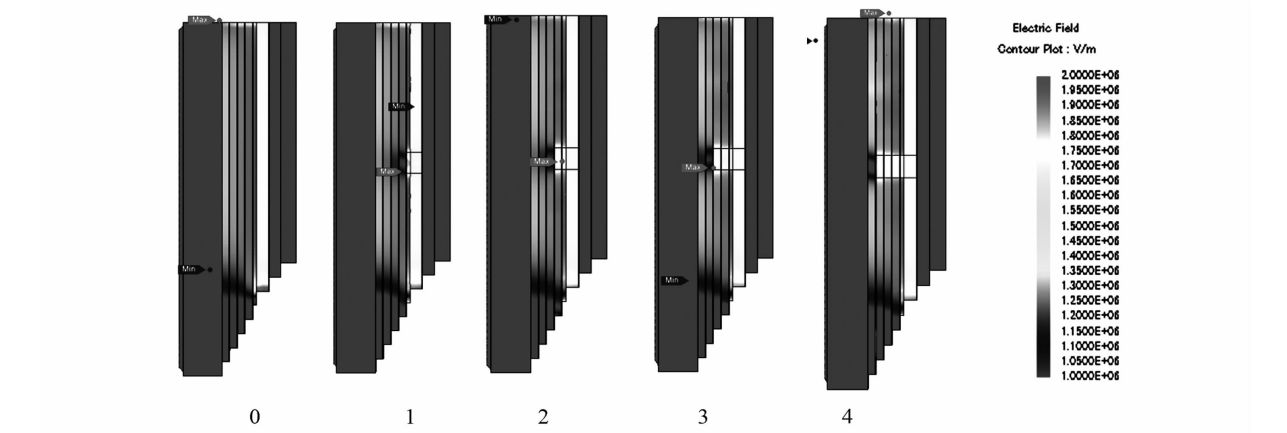
图 3(a)为封闭式绝缘管母线从最外层至内层逐层击穿的电势分布;由于聚四氟乙烯与屏蔽铝膜击穿后形成碳层,仿真中设定了碳层的电阻率,因此,电势分布与正常状态基本一致。图 3(b)为逐层击穿后的电场分布,从图中可以看出,此种结构的封闭式绝缘管母线,在其正常运行时,接地屏内部的固定成型用的热缩管。由于其厚度与叠包的聚四氟乙烯层厚度不一致,承受了较高的电场强度,约为聚四氟乙烯的 1.5 倍;在端部应力锥处,该层端部承受了最大电场,而热缩管的绝缘性能远不及聚四氟乙烯层,因此,该种封闭式绝缘管母线存在绝缘结构不足。当最外层热缩管与第 5 层聚四氟乙烯层击穿后,在击穿处电场强度急剧增大,极易引起由外至内的连锁击穿。

建立实际物理模型,将封闭式绝缘管母线从外至内逐层短接,如图 4 所示,测试其电容量及介损如图 5 所示。

表 1 封闭式绝缘管母线逐层击穿仿真情况



(a) 电势分布(为了对比将电势范围设在 -1 000 ~ 10 000 V 之间)



(b) 电场分布(为了对比将电场强度范围设置在了 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ V/m 之间)

图 3 绝缘逐层击穿仿真结果

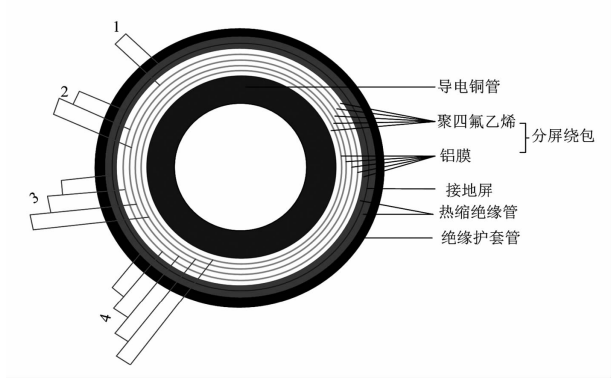


图 4 试验 4 种击穿情况

短接最外层的热缩管及第 5 层聚四氟乙烯,介损出现比较明显的下降。随着短接层数增多,电容量逐渐增大,介损逐渐减少,符合客观规律。因此,可以通过停电测试封闭式绝缘管母线的电容量与介

损,来监督是否存在层间绝缘击穿缺陷。

2.2 绝缘受潮

封闭式绝缘管母线的连接处为其薄弱点,如在安装过程中未进行良好的密封处理;或运行中密封老化,极易造成从外层至内层的绝缘受潮;因此,模拟封闭式绝缘管母线从最外层绝缘逐层向内受潮的物理过程,进行仿真。

分别仿真了如表 2 所示的 6 种情况,JMAG 仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)可以看出,某层绝缘层受潮后,对其电势分布不造成影响,与正常情况时分布基本一致。但受潮后的电场存在变化,当某层受潮后,其电场强度明显增加,这就造成受潮的绝缘层承受更大的电场,发热更严重,极易造成其绝缘破坏。

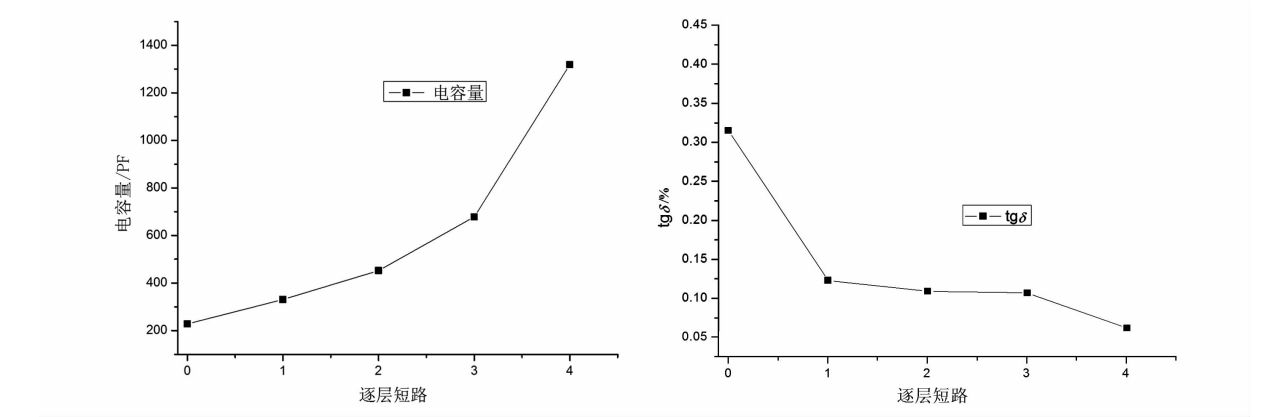
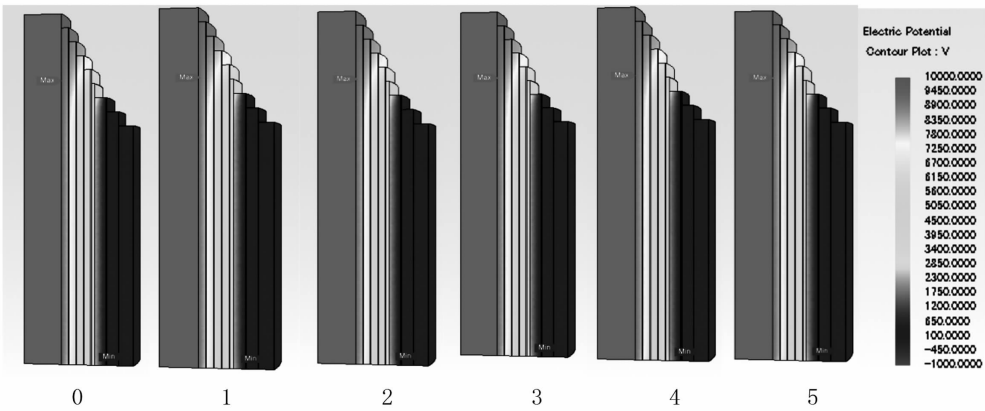


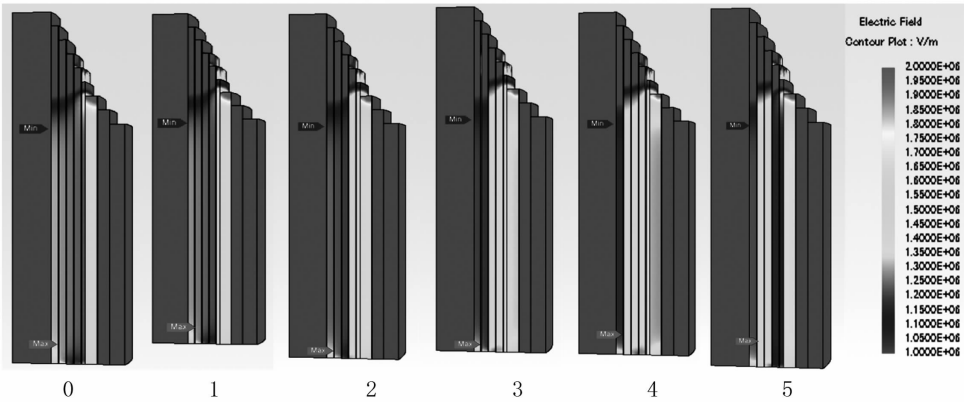
图 5 从外至内逐层短路时电容量及介损测试

表 2 封闭式绝缘管母线逐层受潮仿真情况

0	1	2	3	4	5
正常	聚四氟乙烯 5 受潮	聚四氟乙烯 5 + 聚四氟乙烯 4 受潮	聚四氟乙烯 5 + 聚四氟乙烯 4 + 聚四氟乙烯 3 受潮	聚四氟乙烯 5 + 聚四氟乙烯 4 + 聚四氟乙烯 3 + 聚四氟乙烯 2 受潮	聚四氟乙烯 3 + 聚四氟乙烯 2 受潮



(a) 电势分布(为了对比将电势范围设在 -1 000 ~10 000 V 之间)



(b) 电场分布(为了对比将电场强度范围设置在了 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ T/m 之间)

图 6 绝缘逐层受潮仿真结果

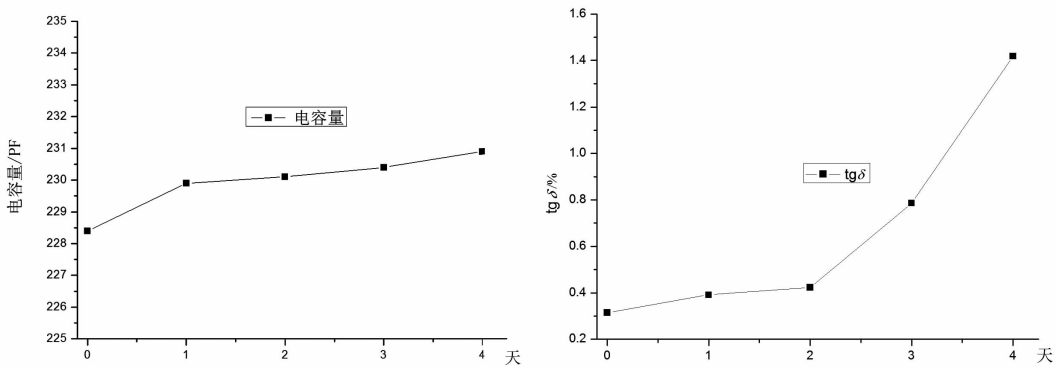


图 7 封闭式绝缘管母线不同受潮时间下的电容量及介损变化情况

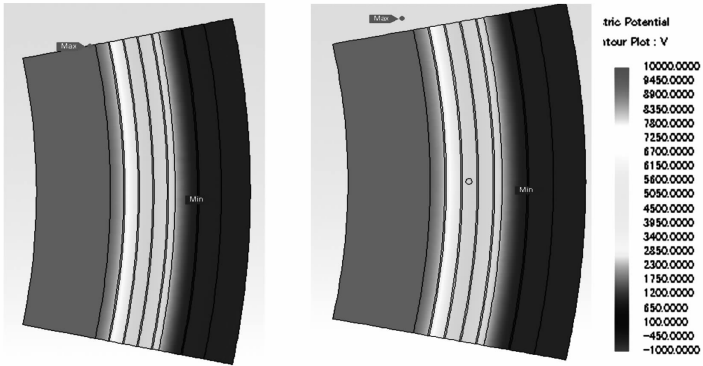
由于每层叠包后的聚四氟乙烯层,无法实现模拟逐层受潮的物理过程,因此,对整体受潮时间进行模拟试验,如图 7 所示。利用超声波起雾器使封闭式绝缘管母线样品受潮,对不同受潮时间的电容量及介损进行测试,可以发现,与击穿不同,随着受潮时间变化,电容量和介损都呈增长趋势,特别是受潮两天后,电容量缓慢增长,介损急剧增长。因此,可通过电容量及介损的变化来判断封闭式绝缘管母线

是否是由于受潮影响。

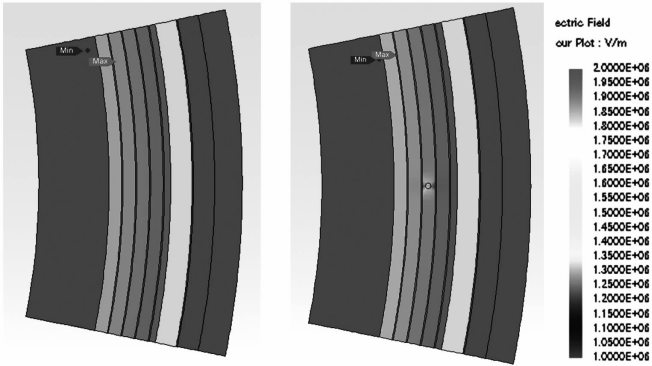
2.3 气泡仿真

由于在聚四氟乙烯绕包过程中,不可避免地存在气隙或气泡,因此,在聚四氟乙烯 3 层设置直径为 0.6 mm 的气泡,气泡中填充空气,进行仿真,如图 8 所示。

可以看出,气泡的存在在一定程度上造成该层聚四氟乙烯电场分布畸变,但是所受影响有限。



(a) 电势分布(为了对比将电势范围设在 -1 000 ~10 000 V 之间)



(b) 电场分布(为了对比将电场强度范围设置在了 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ T/m 之间)

图 8 绝缘层中存在气泡仿真结果

3 结 论

此种结构的封闭式绝缘管母线,在其正常运行时,接地屏内部的固定成型用的热缩管,承受了较高的电场强度,约为聚四氟乙烯的 1.5 倍;在端部应力锥处,该层端部承受了最大电场,而热缩管的绝缘性能远不及聚四氟乙烯层,因此,该种封闭式绝缘管母线存在绝缘结构不足。

绝缘击穿形成碳层、受潮、气泡 3 种典型缺陷对封闭式绝缘管母线的电势分布影响不大。

当绝缘逐层击穿后,在击穿处电场强度急剧增大,极易引起由外至内的连锁击穿,随着短接层数增多,电容量逐渐增大,介损逐渐减少,符合客观规律。当某层绝缘受潮后,其电场强度明显增加,这就造成受潮的绝缘层承受更大的电场,发热更严重,极易造成其绝缘破坏。对不同受潮时间的电容量及介损进行测试发现,随着受潮的严重程度增大,其电容量和介损都呈增长趋势。气泡的存在在一定程度上造成该层聚四氟乙烯电场分布畸变,但是所受影响有限。

由于受潮和击穿后电容量与介损规律不同,可以通过停电测试封闭式绝缘管母线的电容量与介损,来监督并区分是否存在层间绝缘击穿缺陷或绝缘受潮。

参考文献

[1] 关芳,杨益民.管型屏蔽绝缘母线的应用[J].中国水能及电气化,2011(5):59-62.
[2] 宋邦申,绝缘管型母线的性能优势及存在问题分析[J].电工电气,2015(1):60-61.
[3] Q/GDW 1168-2013,输变电设备状态检修试验规程[S].
[4] GB/T 3048-2007,电线电缆电性能试验方法第 11 部分 介质损耗角正切试验[S].
[5] GB 50149-2010,电气装置安装工程 母线装置施工及验收规范[S].

作者简介:

刘 君(1984),博士、高级工程师,主要从事高压电气设备绝缘状态评估及其方法研究。

(收稿日期:2015-12-07)

基于物元综合模型的重点耗能企业电力能效评价研究

卢思瑶¹, 陈 纓¹, 张振雨²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
2. 东方电气股份有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要:随着中国能源与环境问题的加剧,加强节能减排,提升用电能效,已成为重点耗能企业亟待决绝的课题。针对已有的电力能效评价研究较为依赖决策者的主观判断且忽视了指标之间存在不相容性这些不足,从经济、技术和管理 3 个层面构建了基于物元重点耗能企业电力能效评价模型,并以国内某重点耗能企业为例进行实证研究。结果表明,物元模型不仅能评价重点耗能企业电力能效的综合水平,还能揭示其电力能效管理中存在的问题。这为重点耗能企业电力能效管理的改进指明方向。

关键词:重点耗能企业;电力能效评价;物元综合模型;关联度

Abstract:With the intensification of energy and environmental problems in China, strengthening energy saving and emission reduction and improving power efficiency have become a decisive and urgent task for key energy – consuming enterprises. Focusing on the fact that less attention is paid to the objectivity of index assignment and the incompatibility between the indexes, a matter – element synthetical model of power energy efficiency evaluation is constructed for key energy – consuming enterprises in China, and the model is used for an empirical research. The results show that the matter – element synthetical model not only can evaluate the comprehensive power energy efficiency level of key energy – consuming enterprises, but also can reveal the power energy efficiency problems in these enterprises, which points out a direction for power energy efficiency management of key energy – consuming enterprises in China.

Key words:key energy – consuming enterprises; energy efficiency evaluation; matter – element synthetical model; correlation

中图分类号:F062.9 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0064 – 05

0 引 言

能源是社会经济发展的基础。在传统工业发展模式的推动下,中国通过大量的能源消耗换来了快速增长的 30 年。《世界能源发展报告 2015》显示,2014 年中国一次性能源消费总量高达 38.4 亿吨标准煤,占世界能源总消耗量的 21.50%,高居世界第一。能源消耗量的快速增长,不仅加剧了能源供需的矛盾,也给生态环境造成了巨大的污染,能源与环境问题已经成为制约中国经济进一步发展的两大难题。

面对新的发展形势,加强节能减排,提升用电能效,已成为重点耗能企业的必然选择;但同时应当看到,长期以来,中国电力能效的监测与评价的学术工作进展缓慢,这使得许多已经实施或正在酝酿的电力能效的政策和决策一直缺乏清晰的理论指导,因

此,如何在能源短缺和环境污染的双重压力下,构建一套适合于中国重点耗能企业的电力能效评价方法和体系,为重点耗能企业的合理用电以及生产优化提供指导,逐渐成为了学术界研究的焦点。

从已有的理论研究来看,目前对耗能企业的电力能效评价的研究主要集中在以下几个方面:1) 基于层次分析法的电力能效评价。文献[1]在构建水泥企业用电能效评价指标体系的基础上,运用层次分析法进行了相应的能效评价,并结合评估结果给出了相关的完善建议。文献[2]从定性与定量两个维度构建了企业用电能效评价模型,并以化工企业为具体对象对上述评价模型的科学性以及合理性进行了检验。2) 基于数据包络分析法的电力能效评价。文献[3]运用包络分析法对火电厂发电机组的用电能耗进行了评价和优化,并通过优化前后的数据比较验证了上述方法对火电厂改善用电效率的积极影响。文献[4]运用包络模型对 2003—2010 年

间中国电力产业的总体能源效率进行了评价,并进一步揭示能源效率变化的原因。3) 基于综合模型的电力能效评价。文献[5-6]构建了一个层次分析法和熵权法相融合的综合模型,力图克服决策者主观评价信息的影响,以提高电力能效项目用电效率评价的科学性。文献[7]构建了层次分析法,灰色关联法和模糊评价法相融合的制造企业能效评价模。文献[8]构建了 G1 群组判断、熵权法以及主成分分析法相融合的能效评价模型。这为耗能企业的用电能效的科学评价提供了新的思路。

以上的研究,为耗能企业的用电能效评价与优化提供了较好的理论指导。但同时应当看到,现有的理论研究还存在一定的不足:首先,无论是层次分析法、还是包络法、熵权法,都普遍较强烈地依赖决策者的主观判断,客观性不够;其次,虽然一些学者逐渐尝试多种方法相融合的构建思路,但大多忽视了各评价指标结果之间不相容性的问题。针对以上不足,将引入物元综合评价这一新方法^[9-10],构建一套适用于重点耗能企业用电能效评价的指标体系。此理论创新在于,力图将指标重要性的主观判断、数据的客观处理以及指标间的不相容性纳入到统一的分析框架中,进而为重点耗能企业的用电能效管理提供理论指导和参考。

1 重点耗能企业电力能效评价体系设计

构建完整的指标评价体系,是开展重点耗能企业电力能效综合评价的第一步。基于电力能效指标体

系的设置原则以及成熟经验^[1,5],同时结合中国重点耗能企业的用电结构、产品结构、生产工艺以及能源管理的特点,通过综合考虑,构建了重点耗能企业能效评价指标体系。该指标体系包括经济、技术和管理 3 个一级指标体系和 11 个二级指标体系。其中,一级经济能效指标包括单位产品工序电力能耗、单位产值综合电力能耗以及节能率 3 个二级指标,一级技术能效指标包括变压器效率、电压总谐波畸变率、电动机运行效率以及电热设备电能利用率 4 个二级指标,一级管理能效指标包括供电系统测量及监控完备率、节能规划以及规章制度与日常管理 3 个二级指标。具体的指标构成以及指标标识见图 1。

2 物元综合评价模型的构建

2.1 物元的概念及其评价逻辑

物元分析是用于研究和解决不相容问题的科学理论与方法。在物元分析时,识别物元是第一步。对于任一事物 N ,可以用特征 c 和量值 v 对其进行表述,这个由 $N、c、v$ 所构成的有序三元组 $R=(N,c,v)$ 就是物元。物元综合评价方法的基本逻辑如下:首先,根据事物已有的数据对评价对象进行分级处理,并设定各等级的边界数据范围;其次,将评价对象的指标值代入相关等级的集合中进行多决策指标评价;最后,将评价结果与各等级集合的关联度大小进行比较,关联度越大,表示评价结果与对应的等级集合的默契程度越佳。

2.2 重点耗能企业电力能效评价物元矩阵的确定

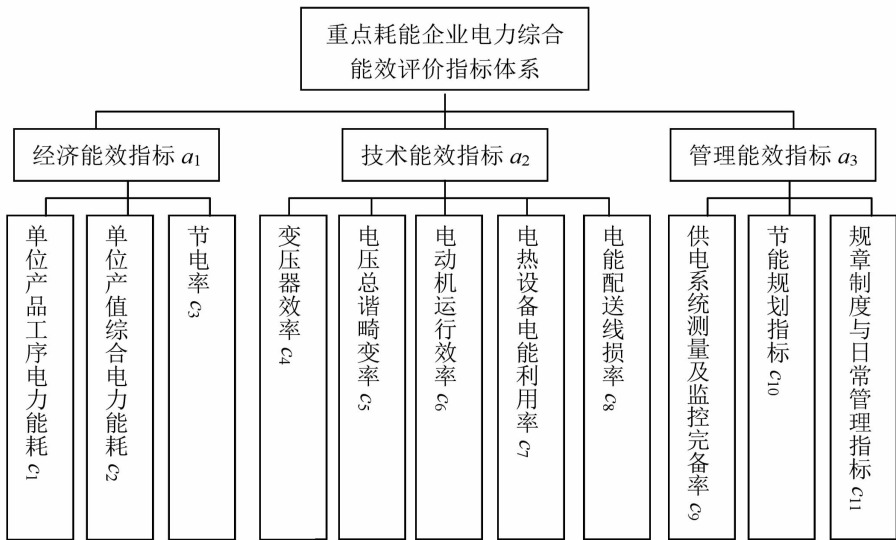


图 1 高耗能企业电力能效评价指标体系

根据物元的定义,重点耗能企业电力能效评价的物元矩阵可用式(1)表示:

$$R=\begin{pmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \cdots & \cdots \\ & c_{11} & v_{11} \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中: R 为重点耗能企业电力能效评价物元; N 为重点耗能企业的电力能效水平; c_i 为重点耗能企业电力能效的指标,其中 $i=1,2,\cdots,11$,记作 $c=(c_1,c_2,\cdots,c_{11})^T$; v_i 为 N 关于 c_i 的量值,记作 $v=(v_1,v_2,\cdots,v_{11})^T$ 。

2.3 重点耗能企业电力能效评价经典域与节域的确定

根据式(1)所展示的重点耗能企业电力能效评价物元矩阵,可得重点耗能企业电力能效的经典域为

$$R_j=\begin{pmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \cdots & \cdots \\ & c_{11} & v_{j11} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1},b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2},b_{j2} \rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & c_{11} & \langle a_{j11},b_{j11} \rangle \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中: R_j 为重点耗能企业电力能效评价物元; N_j 为所划分的 j 个评价等级(等级的多少根据实际情况确定); c_i 为第 i 个指标; v_{ji} 为 N_j 关于指标 c_i 的量值范围,即各个等级关于对应的评价指标标准值的经典域,可用 $v_{ji}=\langle a_{ji},b_{ji} \rangle$ 来表示; a_{ji} 为特征 c_i 取值下限值; b_{ji} 为特征 c_i 取值上限值。

相应的,重点耗能企业的电力能效的节域可以描述为

$$R_p=\begin{pmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \cdots & \cdots \\ & c_{11} & v_{p11} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1},b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2},b_{p2} \rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & c_{11} & \langle a_{p11},b_{p11} \rangle \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中: R_p 为重点耗能企业电力能效评价指标允许取值范围的物元; P 为重点耗能企业电力能效等级的全体; $v_{pi}(i=1,2,\cdots,11)$ 分别为 P 关于 c_i 的取值范围,即 P 的节域,记为 $v_{pi}=\langle a_{pi},b_{pi} \rangle (i=1,2,\cdots,11)$,取值的允许范围应满足 $v_{ji}\subset v_{pi}$ 。

2.4 指标各等级的关联度的确定

关联度用于表示重点耗能企业电力能效评定指标关于各评价等级 j 的归属程度,用 $K_j(v_i)$ 描述可拓集合关联度,它的取值范围为整个实数轴。关联

函数计算值如式(4)所示:

$$K_j(v_i)=\begin{cases} -\frac{\rho(v_i,v_{ji})}{v_{ji}}(v_i\in v_{ji}) \\ \frac{\rho(v_i,v_{ji})}{\rho(v_i,v_{pi})-\rho(v_i,v_{ji})}(v_i\notin v_{ji}) \end{cases} \tag{4}$$

计算 $K_j(v_i)$ 时,即 $j=1$ 当时,在进行第 1 等级判定计算时,对于正指标(指实际值越大,在能效评价中所起正面效应越大的指标),如果出现 $v_i\geq(a_{p_i}+b_{p_i})/2$ 或者对于负指标(指实际值越小,在能效评价中所起负面效应越大的指标),如果出现 $v_i\leq(a_{p_i}+b_{p_i})/2$,则用式(5)进行计算:

$$K_j(v_i)=\begin{cases} 1+\frac{\rho(v_i,v_{ji})}{v_{ji}}(v_i\in v_{ji}) \\ \frac{\rho(v_i,v_{ji})}{\rho(v_i,v_{pi})-\rho(v_i,v_{ji})}(v_i\notin v_{ji}) \end{cases} \tag{5}$$

2.5 重点耗能企业电力能效水平第 j 等级关联度的判定

如果指标 c_i 的权系数为 $\lambda_i(i=1,2,\cdots,11)$ 且 $\sum\lambda_i=1$,则

$$K_j(p_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iK_j(v_i),(i=1,2,\cdots,11) \tag{6}$$

值 $K_j(p_0)$ 表示 p 属于 p_0 的程度。进一步若

$$K_j(p_0)=\max K_j(p_0) \tag{7}$$

则评定重点耗能企业电力能效水平为 j 等级。

从作用来看,重点耗能企业电力能效的物元评价模型的关联度比模糊数学的隶属度所代表的内涵更为丰富,它能揭示出更多的分异信息。当 $K_j(p_0)>0$ 时,表示重点耗能企业电力能效水平符合第 j 级标准的要求,且值越大,符合程度越高;当 $-1\leq K_j(p_0)\leq 0$ 时,表示重点耗能企业电力能效水平不符合第 j 级标准的要求,但具备转化为该级标准的条件,且值越大,越易转化;当 $K_j(p_0)<-1$ 时,表示重点耗能企业电力能效水平不符合 j 级标准的要求,且不具备转化为该级标准的条件,其值越小,表示与某级评判标准的差距就越大。

3 案例分析

某公司创建于 1958 年,是中国大型的重型机械制造企业。经过数十年的持续发展,公司目前总资产已逾百亿元,拥有各类生产设备七千余台;可完成 400 t 级优质钢锭的浇筑、600 t 级优质锻件的锻造以及 770 t 级优质钢水的冶炼,并可完成大型复杂构

表 1 某公司电力能效评价指标关联度输出表

指标关联度	指标权重	高	较高	中等	低	能效评价
$K_j(v_1)$	0.075	-0.398	-0.130	0.398	-0.223	中等
$K_j(v_2)$	0.065	-0.275	0.303	-0.470	-0.682	较高
$K_j(v_3)$	0.050	-0.470	-0.141	0.202	-0.403	中等
$K_j(v_4)$	0.161	0.267	-0.127	-0.707	-0.833	高
$K_j(v_5)$	0.053	-0.502	-0.250	0.675	-0.555	中等
$K_j(v_6)$	0.290	-0.394	-0.089	0.198	-0.341	中等
$K_j(v_7)$	0.115	-0.278	0.481	-0.351	-0.630	较高
$K_j(v_8)$	0.090	-0.420	-0.223	0.130	-0.048	中等
$K_j(v_9)$	0.036	-0.345	0.156	-0.085	-0.465	较高
$K_j(v_{10})$	0.035	-0.259	0.450	-0.345	-0.618	较高
$K_j(v_{11})$	0.030	-0.103	0.098	-0.512	-0.715	较高
$\Sigma K_j(v_i)$	—	-0.263 5	0.003	-0.070 4	-0.480	较高

建的加工;具备较强的公路、水路、铁路等综合远程运输能力;具备从后端冶炼、锻造、热处理、机械加工、装配等到前端售后服务的一体化能力。但近年来随着企业规模的不断壮大,电力能耗问题逐渐凸现,并成为制约公司发展的关键一环。下面引入物元综合模型对某公司的电力能效进行评价,找出其存在的问题并进行相应改善。在电力能效等的评定上,将其分为 4 个等级,分别为“高”、“较高”、“中等”和“低”

3.1 数据的规范化处理

对于那些不能通过客观数据量化的指标,采取主观打分法来确定具体指标的优劣,在操作上,选择了 5 位电力行业的能效专家或学者对某公司电力能耗评价指标各个层级进行打分,然后运用层次分析法 yaaph 软件,计算各指标层级的权重系数。而对可以通过量化得到的指标,则通过无量纲化的处理后评分。运用式(4)计算该公司电力能效评价系统中各二级指标在各等级下的关联度,进一步,运用式(6)和式(7),最终可以得到该公司电力能效指标关联度和综合评价等级。相关的结果如表 1 所示。

3.2 结果分析

从表 1 的结算结果来看,虽然某公司最终的电力能效综合评价为“较高”等级,但在 11 项参与评价的指标中,有 5 项指标的评价仅为“中等”等级,低于综合评价水平。这意味着,对某公司而言,如果要在未来的能效管理中确保自身的用电能效处于较高水平状态,那么提高单位产品工序电力能耗、节电

率、电压总谐波畸变率、电动机运行效率、电能配送线损率这几项指标的表现就变得势在必行。

通过以上的案例计算分析可以发现,物元综合评价模型不仅能对重点耗能企业综合电力能效进行评价,而且还可以分析各项具体指标的表现,能够帮助重点耗能企业迅速地找出制约企业电力能效的问题所在,这为重点耗能企业电力能效管理的改进指明方向。

4 结 语

随着中国能源与环境问题的不断凸显,提升电力能效已成为重点耗能企业亟待解决的课题。基于这一背景,通过将电力能效指标重要性的主观判断、数据的客观处理以及指标间的不相容性纳入到统一的分析框架中,构建了重点耗能企业用电能效的物元综合评价模型,并以某公司为例,对这一模型的实用性进了考察。结果显示:基于物元的重点耗能企业电力能效评价模型,可以较好地揭示重点耗能企业的综合电力能效水平以及能效管理中存在的问题,进而为电力能效的进一步提升提供了可行的操作思路。

参考文献

[1] 宋绍剑,薛春伟. 基于层次分析法的水泥企业电力能效评估[J]. 电力学报, 2012, 27(2): 154 - 157.
[2] 李正明,张纪华,陈敏洁. 基于层次分析法的企业有

序用电模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 136 – 141.

[3] 韦杏秋, 程鹏飞, 陈碧云, 等. 火电机组能耗的数据包络分析方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 44 – 51.

[4] 程雯. DEA 模型的我国电力产业能源效率分析[J]. 经济研究导刊, 2015(7): 45 – 46.

[5] 李慧玲, 芦新波, 刘大川, 等. 基于 AHP – TOPSIS 的电力能效项目综合评价[J]. 现代电力, 2014, 31(4): 88 – 94.

[6] 田贺平, 杜松怀, 韩晓慧, 等. 基于 AHP – 熵权法的企业电力综合能效评估[J]. 智能电网, 2015, 3(2): 112 – 118.

[7] 苑帅, 王坚, 戴毅茹. 基于组合评价方法(AHM – GF)的制造企业综合能效评价研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 21 – 23.

[8] 罗耀明, 毛李帆, 姚建刚, 等. 电力用户综合能效评估

模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 104 – 109.

[9] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.

[10] 杨列奎, 解仝, 张刚, 等. 基于物元综合评价法的高耗能企业电力能效评价[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(6): 44 – 47.

作者简介:
卢思瑶(1986), 硕士研究生、工程师, 研究方向为电力营销与供应链;
陈 纓(1967), 硕士研究生、高级工程师, 国网四川省电力公司博士后创新实践基地博士后合作导师, 研究方向为电力营销与能效评价;
张振雨(1981), 工程师、硕士研究生, 研究方向为电力供应链。

(收稿日期: 2015 – 12 – 22)

(上接第 9 页)

4 结 论

针对 LSSVM 效率极低的靠经验选取参数的问题, 选定了 PSO 算法作为优化策略, 利用 PSO 算法基于种群的并行搜索策略特点来迭代搜索最优的目标函数值, 以求寻找到最优的 LSSVM 参数, 达到自动优化选取关键参数的目的, 使用基于 PSO – LSSVM 的模型对负荷进行了预测。预测结果验证了所提方法的可行性, 通过与不经优化的 LSSVM 的预测结果进行了对比, 进一步突出了所提方法的有效性和准确性。

参考文献

[1] 康操. 基于最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测模型的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[2] 杨毅强, 刘天琪. BP 人工神经网络负荷预测模型的 L – M 训练算法[J]. 四川电力技术, 2006, 29(3): 29 – 31.

[3] Daneshdoost M, Lotfalian M, Bumroonggit G, et al. Neural Network with Fuzzy Set – based Classification for Short – term Load Forecasting[J]. Power Systems, IEEE Transactions on. 1998, 13(4): 1386 – 1391.

[4] 赵宇红, 唐耀庚, 张韵辉. 基于神经网络和模糊理论的短

期负荷预测[J]. 高电压技术, 2006, 31(5): 107 – 110.

[5] 刘绚, 刘天琪. 基于小波变换和遗传算法优化神经网络负荷预测[J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 15 – 18.

[6] 周林, 吕厚军. 人工神经网络应用于电力系统短期负荷预测的研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(6): 68 – 72.

[7] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2 – 10.

[8] 李元诚, 方廷健, 于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 55 – 59.

[9] 张林, 刘先珊, 阴和俊. 基于时间序列的支持向量机在负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 38 – 41.

[10] 侯贺飞, 刘俊勇. 最小二乘支持向量机短期负荷预测研究[J]. 四川电力技术, 2009(S1): 11 – 15.

[11] 罗娜. 数据挖掘中的新方法——支持向量机[J]. 软件导刊, 2008(10): 30 – 31.

[12] Xinxin H, Lijin W, Yiwen Z. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Site Index Curve Model[C]. International Conference on Business Management & Electronic Information, 2011, 3: 838 – 842.

作者简介:
黎津池(1988), 硕士研究生, 研究方向为基于短期负荷预测含分布式发电的电力系统状态估计。

(收稿日期: 2016 – 01 – 28)

配电网抢修指挥平台研究及典型建设探讨

王民昆¹, 吴雪琼², 张国芳¹, 温丽丽¹, 郭 亮¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210016)

摘要:随着智能电网建设的深入开展, 社会对高质量和高可靠性的电能供应提出了更高的要求。通过建设配电网抢修指挥平台全面提升配抢专业化管理水平、提高供电可靠性以及提升优质服务质量。以配电生产业务为主线, 分析“三集五大”模式下配电网生产管理现状, 提出适应于抢修指挥应用的智能配电网生产指挥体系。分析了抢修平台业务功能应用, 结合多个供电公司在具体项目上的实施经验, 根据企业现有业务系统的适应性、资源共享性等方面, 从平台部署模式、移动作业接入模式、平台建设模式 3 个角度探讨了抢修指挥平台的典型建设模式, 并对各建设模式优缺点做出分析, 为供电公司运行检修工作提供有力支撑。

关键词:配电网抢修指挥; 配电检修体系; 典型建设模式

Abstract: With the deep development of smart grid construction, the society has put forward higher requirements for high quality and high reliability of power supply. Through the construction of repairing command platform of distribution network, the overall professional management level, the reliability of power supply and the service quality are improved. Taking the distribution network production as the main line, the current situation of distribution network production management under "three sets of five" mode is analyzed, and the intelligent distribution network production command system is put forward. In view of platform deployment mode, mobile access pattern and platform construction mode, the typical construction model of repairing command platform is discussed, and the advantages and disadvantages of different construction modes are analyzed, which can provide a support for the operation and maintenance of electric power supply company.

Key words: repairing command of distribution network; maintenance system of power distribution; typical construction mode

中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0069-05

0 前 言

随着社会的进步和科学技术的高速发展, 社会对电能供应的质量和可靠性提出了更高的要求。城市越发达其承受停电干扰的能力越差, 即使是短时间的停电扰动, 大则引起一定规模的经济影响, 小则对居民的日常生活带来不便, 长时间停电则会造成社会的不安定以及较大的经济影响。不断提高供电可靠性、减少停电时间以提高客户满意度一直是电力公司追求的共同目标, 而提高配电网运行指挥水平无疑是实现这一目标的重要手段。

同时, 电网规模的日益扩大, 电力公司生产任务越来越多, 生产和检修计划工作也因此变得更加复杂, 电力公司对生产计划的精益化管理要求也越来越高。分析和研究配电生产检修的关键环节、影响设备检修效率的制约因素和设备状态信息获取方

法, 对生产和设备检修计划进行科学合理的优化和提升, 建立配电网抢修指挥平台, 实现配电网生产检修的业务流程优化与闭环管控, 有效提升电网可靠性, 减少重复停电, 降低售电损失, 提升设备效能、电网效能和人员效率, 提升客户满意度和企业社会形象, 是当前投入少、见效快、效益高的重要的创新举措。

下面以建设配电网检修专业化和运维一体化的管理体系为指导思想, 研究和提出适应于配电生产抢修管理的统一信息模型及交互技术, 提出配电网生产抢修指挥体系架构, 研究基于全网拓扑的故障研判机制和配电网故障停电快速协调指挥机制, 实现配电运行检修的统一指挥和调度。

1 配电检修体系研究

配电网运维检修和故障抢修等业务涉及到调

度、营销、运检等多个部门的协同工作,高效、合理的指挥体系是实现配电生产业务高效开展的保障,同时,也为配电网抢修指挥平台的开发提供指导作用。配电检修体系研究以配电生产业务为主线,分析“三集五大”模式下配电网生产管理现状;梳理计划检修、停电管理、故障抢修等核心业务流程;明确各业务部门之间的边界和衔接关系,在分析、总结现有配电生产指挥体系的基础上,提出适应于抢修指挥应用的智能配电网生产指挥体系。

为提高科学决策效率和供电可靠性,以配电生产管理流程为主线、以运行机制为支撑、以组织结构为保障、以指挥平台为工具,提出配电网生产指挥体系。

- 配电生产指挥体系的建设步骤为:
- 1) 依据计划类和非计划类工作的内容建立合理的流程;
 - 2) 基于流程建立体系的运行机制;
 - 3) 建立管理组织体系;
 - 4) 基于信息和技术支撑建设指挥平台。

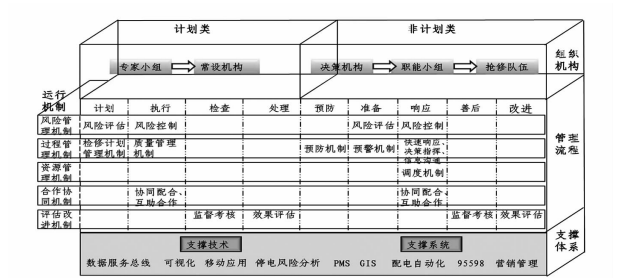


图 1 配电生产指挥体系架构图

2 配电网抢修指挥平台建设

通过对配电网抢修指挥业务应用研究,开展配电网抢修指挥平台建设工作,整合配电自动化信息、PMS/GIS 信息、95598 信息、CIS 信息、用电信息采集信息、GPS 信息、视频信息实现生产业务应用、故障抢修指挥、日常应用,全面提高配电网运维、检修及故障抢修管理水平,充分利用配电生产需要的相关设备信息、电网模型和空间信息,实现风险超前防范和生产科学管理,深化配电网状态管理,技术上推进配电网运维管理、检修抢修和技术改造标准化管理,全面提高配电网运维、检修和技术改造工作质量。

2.1 基于 SOA 架构的信息集成架构

建设松耦合架构模式的智能互动抢修服务指挥

系统,通过符合 IEC 61968 标准的数据交互总线与相关业务系统以 SOA 松耦合方式集成,封装数据和功能以服务的方式在总线上发布,信息交互标准遵循 IEC 61970/61968 规范,做到业务数据“源端唯一、全局共享”,在信息融合贯通的基础之上,实现配电生产和抢修的综合应用。

配电网生产抢修指挥平台基于 SOA 架构的信息集成,从上、下游已经建立的应用系统中获取相关的应用服务,达到信息共享的目标。按照符合 IEC 61968/ 61970 信息标准,各个应用系统之间的信息集成和业务应用必须依据“源端唯一、全局共享”原则进行。通过信息交互实现配电网生产抢修指挥平台与相关应用系统之间的资源共享和功能整合。

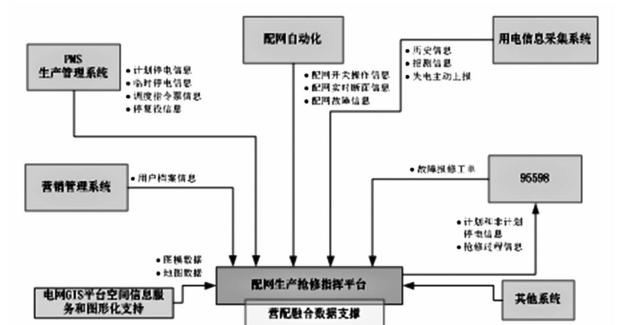


图 2 系统接口交互集成图

2.2 灵活的配用电业务系统信息融合

现有电网建设构架中营配业务涉及的多套业务系统均有涉及中低压配电模型,以“源端唯一”原则为基础,将生产管理系统定位为中压配电设备台帐的数据源、将电网 GIS 平台定位为中低压网络拓扑的数据源、将营销管理系统定位为用户模型的数据源,空缺的低压设备台帐的数据源将通过抢修平台中的低压数据管理模块完成。除营销管理系统外,其他均是生产业务部门应用系统,生产维护的中低压设备模型与营销维护的低压用户模型将通过统一的用户集实现贯通,从而实现中低压一体化的网络模型。

2.3 实现多端发起、协同参与的故障研判分析

采用基于报修信息的实用化配电网实时故障定位方法,以电网拓扑结构为基础,以报修信息为辅助,实时定位可能的故障源。支持多端故障发起,多方协同参与(自动化、用采、95598 等)、动态配置研判策略、灵活运用各方信息来源实现精确定位的故障处理机制。同时,对研判分析的结果提供量化的评价指

• 71 •

的协同办公,基于 GIS 和移动技术的抢修指挥应用当前已经在天津、重庆、成都等城市开展试点工作。试点中发现由于移动通信信号不稳定、移动信号屏蔽等问题,造成极易发生工单丢失、工单状态不同步等问题。平台采用高可靠的智能移动终端自校验技术,优化智能移动终端与服务端数据交互机制,从账号登陆机制、数据同步机制、工单派发机制、工单反馈机制和断网处理机制几个方面加固抢修指挥应用服务端与移动端的交互,保证了抢修业务流程的闭环管理,为山区、信号较弱地区的抢修工作提供了技术解决手段,提高抢修效率,保障供电可靠性。

4) 以效能最优为目标的检修计划优化平衡技术。基于效能最优的停电计划优化技术紧扣停电计划的编制、协调与平衡 3 个环节,建立了“部门优化”、“协调优化”、“全局优化”3 层优化算法框架,通过部门优化帮助基本部门利用拓扑分析、约束优化等技术,自动分析停电计划中的错漏问题;通过协调优化,自动动态提醒不同生产部门捏合相关的停电工作;通过全局优化,在前两层优化的基础上,综合考虑重复停电、电网安全、人力资源等因素进行总体优化。通过这 3 层优化,可以减少重复停电、提升部门之间协调效率、平衡工作量,从而提升计划检修中的效能。

4 典型建设模式分析

随着智能电网的建设,电网公司系统内部、省公司开展了配电检修相关研究和建设工作,如天津、上海、浙江、江苏、福建、宁夏等地区。平台建设基于营配融合数据,开展了故障报修工单管理、生产指挥应用、停电研判、抢修指挥、检修计划优化、分析与决策等功能应用,根据各地区信息化建设情况、抢修业务流程采用不同模式进行抢修指挥平台建设,并取得了一定的成果。

4.1 平台部署(一/二级)模式分析

1) 一级(直辖市)部署模式

一级(直辖市)部署模式是配电抢修指挥平台单独建设,在电力公司一级部署在安全 IV 区,与电力公司一级部署的业务系统通过信息交互总线进行互联互通,每个地区公司的 EMS、DMS 通过信息交互总线将实时数据传递给生产抢修指挥平台,实现接单、研判、派单、统计分析等功能。地区以及县级

抢修调度指挥人员通过远程工作站模式统一登录使用。一级部署方式具有实施周期短、后期维护简单等特点,适用于大规模推广建设。

2) 二级(地市)部署模式

二级(地市)部署模式是平台部署在地区公司安全Ⅲ区,通过信息交互总线与一级部署的业务系统通过信息交互总线进行互联互通,只接入该地区实时系统的实时数据,实现接单、研判、派单等功能。同时在电力公司建设一级抢修指挥平台,实现省级范围内的抢修业务数据的统计分析功能。该种建设模式满足了地市公司覆盖范围内的抢修指挥业务应用需求,不同地市公司应用遵循统一设计标准,能够结合辖区内管理模式,提出个性化需求,满足差异化应用。

4.2 移动作业接入模式分析

基于移动作业平台技术的在线手持终端,与抢修业务流程紧密联系,通过无线 3G 网络,实现调度主站与抢修现场 PDA 手持终端的抢修互动,并支持在移动作业终端上查看地理图信息。智能移动作业应用建设过程中,从物理、边界、终端、网络、带宽冗余、主机、应用进行全方位、立体化设计,采用不同移动作业终端接入方式,实现信息安全防御,及抢修中心与现场作业互动。

1) 以安全接入平台模式接入

平台主站接入国网统一建设的安全接入平台,通过 3G 无线网络与 PDA 等抢修终端设备交互。安全接入平台采用一级部署,实现了公网与电力信息大区的安全隔离,主要应用于电力抄表、电力线路巡检作业、应急作业处理等电力信息的安全接入。

采用该模式建设移动作业应用需要综合考虑电力公司安全平台建设情况,以及现有信息接入量、网络带宽冗余是否能够满足抢修指挥平台信息流量需求。在网络流量满足抢修平台建设需求的情况下,直接利用现有网络实现移动作业应用,大大节约了建设成本,提高了建设速度。

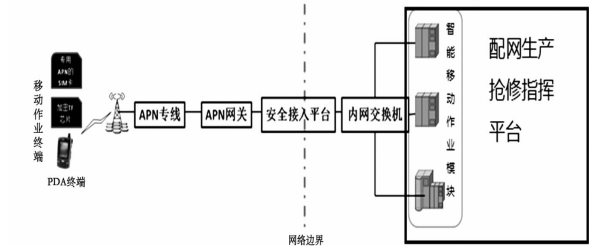


图 6 安全接入平台接入模式

2) 以 3G、VPN 或外网服务器模式接入

在需要新建作业终端接入平台主站的电力公司,可通过建设 VPN 专网和接入 3G 网络,实现移动作业应用。在已通过内外网服务器通信实现公网与电力信息大区交互的电力公司,可以采用利用已有外网服务器模式实现移动作业应用。独立建设移动作业信息接入网络,灵活性较高,网络资源使用也较为自由,但是 VPN 专网线路的铺设、流量包费用等会提高项目的建设成本及建设周期。

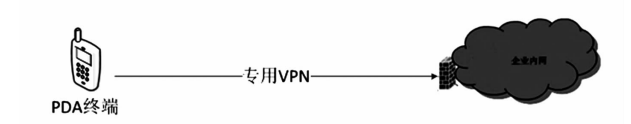


图 7 专网 VPN、3G 接入模式

4.3 平台建设模式分析

在配电网建设整体解决方案中,采用“一条总线,一个平台,两个应用”的建设思路。一个总线,即通过信息交互总线实现业务数据交互;一个平台,即一体化支撑平台,是实现系统开发和运行的基础,包含数据管理、信息传输与交换、公共服务等层次,为配电网调度控制应用提供横向集成、总线贯通的技术支撑;两个应用,即配电网运行监控和配电网抢修指挥。

1) 配抢一体化建设

配抢一体化建设模式,在一体化支撑平台下,针对面向安全 I 区的实时监控调度业务需要,开展配调管理、图模维护、馈线自动化及高级应用功能建设;针对面向安全 III 区的抢修指挥业务需要,实现工单管理、计划停电分析、故障停电研判等功能。平台建设对电网 GIS 平台、生产管理系统、营销管理系统提出了信息集成要求,通过系列接口标准,实施信息整合,为抢修指挥应用提供技术支撑。

绵阳、成都两城市抢修平台采用配抢一体化建设模式,其优点是能够共用基础软件、通信设备、部分硬件服务器及安防设备,建设周期短,投资省、降低系统间协调联络难度。建议前期未进行配电自动化系统建设的地区,考虑这种模式进行建设。

2) 抢修指挥平台独立建设

抢修指挥平台独立建设是指配电网运行监控与抢修指挥彼此分离独立建设,在安全 I 区建设配电

主站,III 区建设抢修平台,依托信息交换总线实现信息流交互与应用集成整合。

银川、吉林等地抢修平台采用平台独立建设模式,其优点是彼此之间独立性高,应用之间受影响性小。建议前期已进行配电自动化系统建设的地区,可考虑按照这种模式进行建设。

5 结 语

以上从平台部署模式、移动作业接入模式、平台建设模式 3 个角度介绍了抢修指挥平台的建设模式,并结合各个电力公司应用情况对各建设模式优缺点做出分析。

以“一个用户报修、一张服务工单、一支抢修队伍、一次到达现场、一次完成故障处理”为目标,建设标准化配网抢修指挥平台。在建设过程中重点关注营配数据融合、抢修业务全流程协同、系统间信息交互、运维管理体系建设 4 方面的问题,根据以上几种方案的优缺点,各公司可以根据自身公司的特点以及外围各系统的建设情况,因地制宜地选择适合自身的模式。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司关于印发“三集五大”管理通则的通知[R].
- [2] 国家电网公司. 关于印发《配网生产抢修指挥平台功能规范》的通知[R].
- [3] 国家电网公司. 配电网调度控制系统技术规范(征求意见稿)[I].

作者简介:

王民昆(1973),高级工程师,从事电力系统自动化技术研究及管理;

吴雪琼(1984),工程师,从事电力信息交互集成、配电自动化技术研究和产品开发;

张国芳(1985),工程师,从事电力系统自动化技术研究及管理;

温丽丽(1982),工程师,从事电力系统自动化技术研究及管理;

郭亮(1982),工程师,从事电力系统自动化技术研究及管理。

(收稿日期:2015-08-12)

城市轨道交通供电多脉波整流机组分段外特性分析

傅晓锋,康积涛,刘 文,刘东霖
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:基于 Matlab/Simulink 仿真和计算分析得到多脉波整流机组的分段外特性曲线,用得到的分段外特性曲线详细计算得到其戴维宁等效电路,再用得到的等效电路进行城市轨道电路的仿真,并将结果和原仿真模型得到的结果进行比较,表明其分析是有效的。

关键词:多脉波整流机组;戴维宁等效电路;分段外特性

Abstract:The segmented external characteristic curve of multi - pulse rectifier unit is obtained by the simulation and calculation analysis based on Matlab/Simulink. With a detailed calculation of the obtained curve, Thevenin's equivalent circuit is constructed, and then the equivalent circuit is used for the simulation of urban track circuit. The results are compared with the results of original model, which shows that the analysis is valid.

Key words:multi - pulse rectifier unit; Thevenin's equivalent circuit; segmented external characteristics

中图分类号:TM76 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)02 - 0074 - 04

0 前 言

地铁等城市轨道交通(以下简称城轨)供电系统的整流机组是其最关键的设备。其中多脉波整流机组(主要有 12 脉波整流和 24 脉波整流)不但实现了交流电源的整流,还使得得到的电能质量能满足于供电系统并减少注入电网的谐波。

然而,多脉波整流机组的详细分析十分复杂,而一般工程计算需要简化分析计算^[1]。基于 Matlab/Simulink 仿真,详细计算分析得到其外特性的分段模型,并进一步得到相应的戴维宁等效模型用于城轨供电仿真,将其与原仿真模型得到的结果进行比较。

1 12 脉波整流机组

1.1 机组构成

12 脉波整流机组由三相桥式整流电路和整流变压器等组成。两个三相桥式整流电路并联构成 12 脉波整流器。整流变压器一般采用轴向双分列式三绕组变压器,其简化结构图如图 1 所示^[2]。

1.2 机组输出电压特性

12 脉波整流机组有如下输出电压调整特性^[3]:

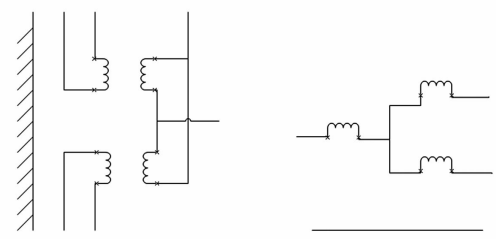


图 1 三相双绕组双分裂变压器简化图

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} \tag{1}$$
$$U_{d1} = U_{d0} - \frac{3}{2\pi} x_c I_d \tag{2}$$
$$U_{d2} = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3}+1)}{4} \sqrt{U_{d0}^2 - \frac{1}{2-\sqrt{3}} \left(\frac{3}{\pi} x_c I_d \right)^2} \tag{3}$$
$$U_{d3} = \frac{\sqrt{3}(1-k)^2+1}{2-\sqrt{3}k} U_{d0} - \frac{3}{2\pi} \frac{2+\sqrt{3}k}{2-\sqrt{3}k} x_c I_d \tag{4}$$
$$U_{d4} = \frac{\sqrt{3}(1-k)}{2-\sqrt{3}k} \sqrt{U_{d0}^2 - (2+\sqrt{3}k)^2 \left(\frac{3}{2\pi} x_c I_d \right)^2} \tag{5}$$
$$U_{d5.1} = \frac{\sqrt{3}(1-k)(8-3k^2)}{2(2-\sqrt{3}k)\sqrt{3(1-k)^2+1}} U_{d0} - \frac{9}{2\pi} \frac{(1-k^2)(2+\sqrt{3}k)}{2-\sqrt{3}k} x_c I_d \tag{6}$$
$$U_{d5.2} = \frac{\sqrt{3}(1-k)(4-3k)}{2\sqrt{3(1-k)^2+1}} U_{d0} - \frac{9}{2\pi} (1-k^2) x_c I_d \tag{7}$$

式中: RF 为电抗系数; U_{d0} 为理想空载直流电压; I_d

为直流输出电流; x_c 为换相电抗,由交流系统阻抗和变压器阻抗组成。上述区段的电压调整特性因耦合系数 k 的不同而出现不同区段。可以看出,当 k 一定时,输出电压 U_{d1} 、 U_{d3} 、 $U_{d5.1}$ 和 $U_{d5.2}$ 的外特性可表示为直线; U_{d2} 、 U_{d4} 则表现为曲线。此外, $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界条件为^[4]

$$\frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\pi(2 - \sqrt{3})}{6} \tag{8}$$

$U_{d2} \rightarrow U_{d3}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\pi(\sqrt{3}k + 2)}{6(\sqrt{3} + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \tag{9}$$

$U_{d3} \rightarrow U_{d4}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{2\pi}{3(\sqrt{3}k + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \tag{10}$$

$U_{d4} \rightarrow U_{d5.1}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{3}(2 - k)\pi}{3(\sqrt{3}k + 2)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \tag{11}$$

$U_{d5.1} \rightarrow U_{d5.2}$ 的临界条件为

$$RF = \frac{x_c I_d}{U_{d0}} = \frac{[4\sqrt{3} + 6 - (3 + 3\sqrt{3})k]\pi}{18(k + 1)\sqrt{3k^2 - 6k + 4}} \tag{12}$$

由上述公式可知外特性曲线比较复杂,因此工程中应用时常将其用分段线性化简化,即将各段曲线/直线的起点和终点连起来,得到的各段直线表达式的截距即是戴维宁等效电路的理想电压源值比上理想空载直流电压 U_{d0} 的值;斜率的绝对值乘以换相电抗 x_c 即得到戴维宁等效电路的内阻。下面将以实例计算分析其计算过程。

1.3 实例计算

若分裂变压器的额定容量 S_k 为 3 450 kVA,系统一次侧短路容量 S_T 为 100 MVA,网侧、阀侧电压 U_1 、 U_2 分别为 35 kV、1 180 V,分裂变压器穿越、半穿越阻抗百分比 $U_k\%$ 、 $U_b\%$ 分别为 8.0%、6.0%,额定直流电压 U_{dN} 为 1 500 V,额定空载直流电压 U_{dN0} 为 1 640 V,理想空载直流电压; $U_{d0} = 1.398 \times U_2 = 1.398 \times 1\,180 = 1\,649.64\text{ V}$,则有:

穿越阻抗为

$$\begin{aligned} x_k &= \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_2^2}{S_T} = \frac{8}{100} \times \frac{1\,180^2}{3\,450\,000} \\ &= 0.032\,287\,5\,\Omega; \end{aligned}$$

半穿越阻抗为

$$\begin{aligned} x_b &= \frac{U_b\%}{100} \times \frac{U_2^2}{S_T/2} = \frac{6}{100} \times \frac{1\,180^2}{3\,450\,000/2} \\ &= 0.048\,431\,3\,\Omega \end{aligned}$$

交流系统阻抗为

$$x_s = \frac{U_2^2}{S_k} = \frac{1\,180^2}{100\,000\,000} = 0.013\,924\,\Omega$$

换相电抗为

$$x_c = x_s + x_b = 0.062\,355\,3\,\Omega$$

双分裂变压器的耦合系数 k 为

$$k = \frac{x_s + 2x_k - x_b}{x_s + x_b}$$

由上述数据求得耦合系数 $k = 0.482\,201$;由相

关文献可知,当 $\frac{\sqrt{3}-1}{3} < k < \frac{2}{3}$ 时,最后一个状态区间不会出现,所以将此时的 x_c 、 k 、 U_{d0} 带入式(8)至式(11)编程计算,依次求得:

$I_{d2} = 3\,711.65\text{ A}$, $I_{d3} = 7\,834.11\text{ A}$, $I_{d4} = 14\,548.9\text{ A}$, $I_{d5} = 19\,123.9\text{ A}$ (注:设 $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界电流标号为 I_{d2}),另起点为空载时,所以 $I_{d1} = 0$;

$RF2 = 0.140\,298$, $RF3 = 0.296\,124$, $RF4 = 0.549\,94$, $RF5 = 0.722\,87$ (注:设 $U_{d1} \rightarrow U_{d2}$ 的临界电抗系数标号为 $RF2$), $RF1 = 0$ 。

将得到的 I_{d2} 、 I_{d3} 、 I_{d4} 、 I_{d5} 分别带入式(2)~式(5)编程计算,依次求得

$U_{d2} = 1\,539.14\text{ V}$, $U_{d3} = 1\,334.66\text{ V}$, $U_{d4} = 848.048\text{ V}$, $U_{d5} = 261.641\text{ V}$,另 $U_{d1} = U_{dN0} = 1\,640\text{ V}$ 。可得

$$\frac{U_{d1}}{U_{d0}} = \frac{1\,640\text{ V}}{1\,649.64\text{ V}} = 0.994\,156$$

$$\frac{U_{d2}}{U_{d0}} = \frac{1\,539.14\text{ V}}{1\,649.64\text{ V}} = 0.933\,013$$

$$\frac{U_{d3}}{U_{d0}} = \frac{1\,334.66\text{ V}}{1\,649.64\text{ V}} = 0.809\,059$$

$$\frac{U_{d4}}{U_{d0}} = \frac{848.048\text{ V}}{1\,649.64\text{ V}} = 0.514\,081$$

$$\frac{U_{d5}}{U_{d0}} = \frac{261.641\text{ V}}{1\,649.64\text{ V}} = 0.158\,605$$

由上面得到的数据绘制得到如图 2 所示的 12 脉波整流机组分段外特性曲线图。

进一步可以得到各段戴维宁等效的内阻:

$$R_{eq1} = |k_1| x_c = \frac{0.994\,156 - 0.933\,013}{0.140\,298 - 0}$$

$$\times 0.062\,355\,3 = 0.027\,1752\,\Omega$$

$$R_{eq2} = |k_2| x_c = \frac{0.933\,013 - 0.809\,059}{0.296\,124 - 0.140\,298}$$

$$\times 0.062\,355\,3 = 0.049\,601\,2\,\Omega$$

$$R_{eq3} = |k_3| x_c = \frac{0.809\,059 - 0.514\,081}{0.549\,94 - 0.296\,124}$$

$$\times 0.062\,355\,3 = 0.072\,467\,8\,\Omega$$

$$R_{eq4} = |k_4| x_c = \frac{0.514\,081 - 0.158\,605}{0.722\,87 - 0.549\,94}$$

$$\times 0.062\,355\,3 = 0.128\,178\,\Omega$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为图 2 中各段直线斜率的绝对值,求得 $k_2=0.795\ 46$, $k_3=1.162\ 18$ 。

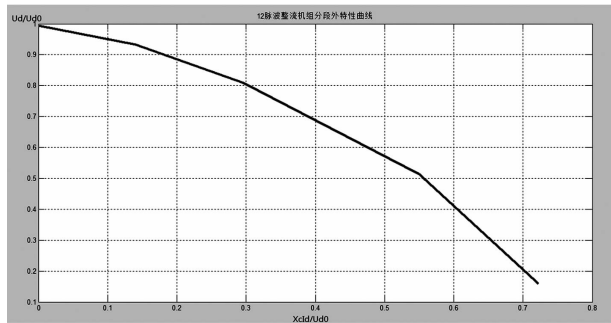


图 2 12 脉波整流机组分段外特性曲线

当上述 12 脉波整流机组工作在第一区时,其戴维宁等效电路的理想电压源电压 $U_{s1}=U_{d0}=1\ 649.64\ \text{V}$, 其内阻为 $R_{eq1}=0.027\ 175\ 2\ \Omega$ 。

当工作在第二区时,如图 3 所示黑色线段即为其工作区段,两 endpoint 坐标已在前面求出,延长线段两端交至坐标轴上如图细线所示,可求得与纵轴的交点坐标为 $(0, 1.044\ 614)$, 即得截距为 1.044 614, 所以得 $U_{s2}=\text{截距} \times 1\ 649.64=1.044\ 614 \times 1\ 649.64=1\ 723.24\ \text{V}$, 内阻 $R_{eq2}=0.049\ 601\ 2\ \Omega$ 。

当工作在第三区时,如图 4 所示黑色线段即为其工作区段,两 endpoint 坐标已在前面求出,延长线段两端交至坐标轴上如图细线所示,可求得与纵轴的交点坐标为 $(0, 1.153\ 208)$, 即得截距为 1.153 208, 所以得 $U_{s3}=\text{截距} \times 1\ 649.64=1.153\ 208 \times 1\ 649.64=1\ 902.38\ \text{V}$, 内阻 $R_{eq3}=0.072\ 467\ 8\ \Omega$ 。

2 24 脉波整流机组

2.1 机组构成

城轨用 24 脉波整流机组一般由两个相差 15° 的 12 脉波整流机组并联而成,仿真模型如图 5 所示。工程计算上使用时可认为其由 2 个 12 脉波整

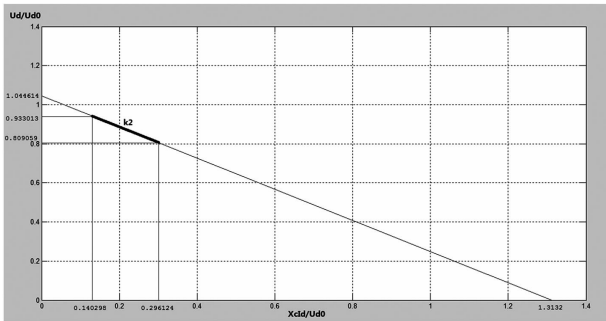


图 3 12 脉波整流机组分段第二区曲线

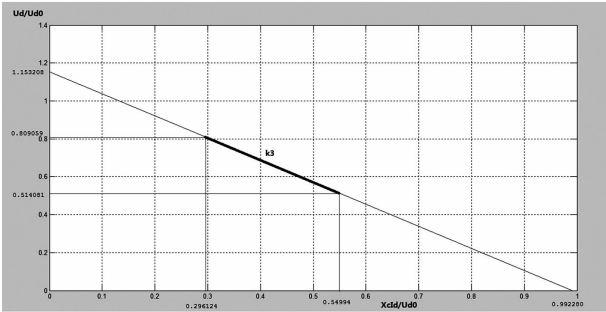


图 4 12 脉波整流机组分段第三区曲线

流电路并联独立工作。

2.2 仿真分析

2.2.1 原 24 脉波整流电路仿真分析

图 5 所示仿真电路中,变压器额定容量 S_k 为 3 450 kVA,系统一次侧短路容量 S_T 为 100 MVA,网侧、阀侧电压 U_1 、 U_2 分别为 35 kV、1 180 V,整流器参数采用默认设置,连接的 RLC-Load 负载设置为纯 R 负载,其额定电压为 1 500 V,功率为 1.5 MW。

在 Matlab/Simulink 中仿真,结果如图 6 所示,负载电压有效值约为 1 546 V,负载电流有效值约为 1 031 A。

2.2.2 24 脉波整流戴维宁等效电路仿真分析

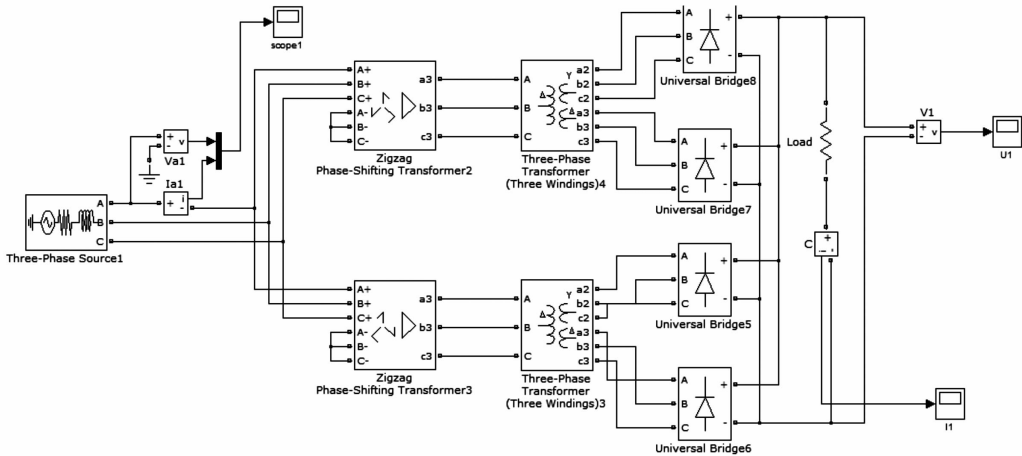
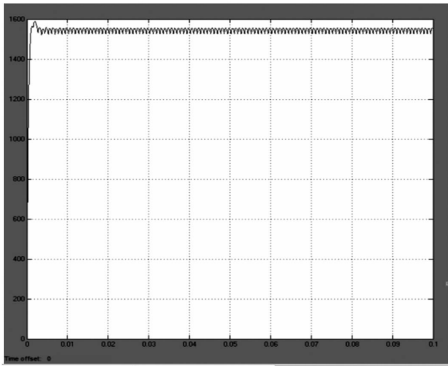
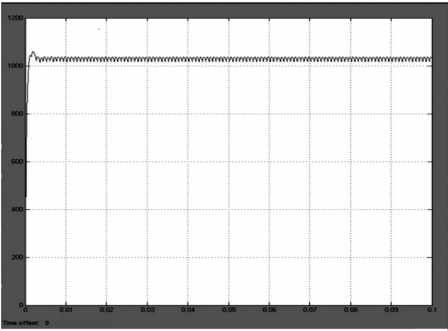


图 5 24 脉波整流电路仿真模型



(a) 负载电压波形图



(b) 负载电流波形图

图 6 24 脉波整流机组负载输出曲线

下面再用 1.3 节中得到的戴维宁等效电路来仿真,以整流器工作在第一个工作区间为例。此时的,戴维宁等效电压源和内阻为 $U_{s1}=1\,649.64\text{ V}$, $R_{eq1}=0.027\,175\,2\,\Omega$,根据等效 24 脉波并联叠加的等效原理将两个

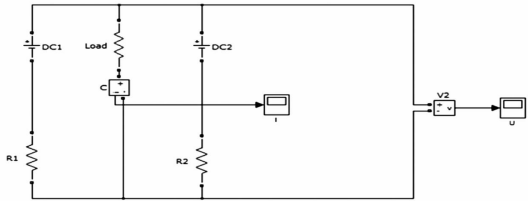


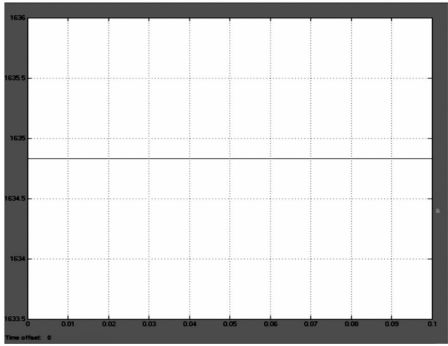
图 7 24 脉波整流电路戴维宁等效电路模型

12 脉波整流戴维宁等效电路并联,从而可以得到如图 7 所示的仿真电路,连接的负载参数同上。仿真结果如图 8 所示,负载电压有效值约为 $1\,635\text{ V}$,负载电流有效值约为 $1\,090\text{ A}$ 。

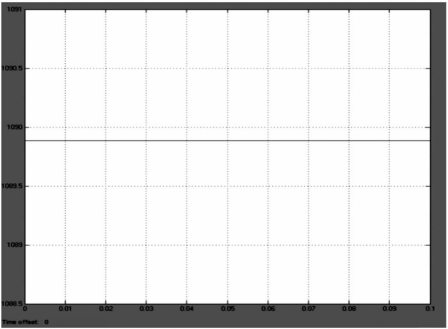
比较两组数据($1\,546\text{ V}$, $1\,031\text{ A}$)和($1\,635\text{ V}$, $1\,090\text{ A}$)可以发现简化的 24 脉波整流机组等效模型基本符合预期要求。

3 结 论

多脉波整流机组外特性分析是城轨供电系统的基础分析。从整流机组输出电压公式和各工作区间临界条件出发,详细推导计算了各工作区间对应的戴维宁等效电压源和内阻,并将等效电路应用在仿真模型中(图 7),进一步仿真其工作在第一区间时



(a) 负载电压波形图



(b) 负载电流波形图

图 8 戴维宁等效电路负载输出曲线

负载的电压和电流。同时运用原(非戴维宁等效的)24 脉波整流电路在相同的负载条件下进行仿真(图 5),通过比较两组模型中负载电压和电流的接近性,表明分段外特性的简化应用是符合要求的。

参考文献

[1] 李良威. 城市轨道交通直流侧短路故障研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
[2] 王念同,魏雪亮. 轴向双分裂式 12 脉波牵引整流变压器均衡电流的分析计算(上)[J]. 变压器,2000,37(3):1-6.
[3] Pozzobon P. Transient and Steady-state Short-circuit Currents in Rectifiers for DC Traction Supply[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology,1998,47(4):1390-1404.
[4] 刘炜. 基于多折线为特性模型的直流牵引供电系统稳态短路计算[J]. 机车电传动,2008(1):61-64.

作者简介:

傅晓锋(1989),硕士研究生,研究方向为城市轨道交通供电系统;

康积涛(1961),博士、教授,研究方向为电力系统无功与电压稳定性、电力变压器原理、轨道交通牵引供电系统仿真计算等;

刘 文(1990),硕士研究生,研究方向为新能源发电与并网;

刘东霖(1990),硕士研究生,研究方向为新能源发电与并网。

(收稿日期:2015-09-07)

某市大型居住小区负荷增长特性研究

胡春华,程淑英,王 宇
(国网内江供电公司,四川 内江 641000)

摘 要:从 OPEN3000 调控系统中提取专线用户负荷数据,对某地级市多个大型居住小区多年用电负荷进行了统计;分析其最大负荷率、长时负荷水平、增长特性,进而与原供电方案中计算负荷的比例关系进行了对比分析;分析计算负荷测算和变压器的选取是否适当,以期对电网规划、供电方案编制起到决策参考作用。

关键词:配电网;计算负荷;居住小区;变压器;规划

Abstract:The load data of special power line are extracted from the OPEN3000 control system, and power loads for many years of several large residence communities in a prefecture – level city are collected for statistics. The maximum load factor, long – time load level and growth characteristics are analyzed and then its proportional relationship with the calculated load in the original power supply scheme is compared. Finally, whether the calculation of load and the selection of transformer are proper is analyzed, which may play a role in decision making for power grid planning and power supply scheme programming.

Key words:distribution network; calculated load; residential district; transformer; planning

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954(2016)02 – 0078 – 03

引 言

目前,供电公司对大型居住小区用电负荷增长特性未有效开展跟踪分析。实际工作中,涉及到配电网规划、大型居住小区供电方案制定时,往往以经验来测算负荷、选择参数,缺乏实证检验。

文献[1]规定居住建筑用电 30 ~ 70 W/m²(4 ~ 16 kW/户)、公共建筑用电 40 ~ 150 W/m²、工业建筑用电 40 ~ 120 W/m²、仓储物流建筑 15 ~ 50 W/m²、市政设施建筑 20 ~ 50 W/m²。文献[2]规定配电变压器的长期工作负载率不宜大于 85%。文献[3]规定一般客户的计算负荷宜等于变压器额定容量的 70% ~ 75%;建筑面积在 50 m² 及以下住宅用电每户容量宜不小于 4 kW;大于 50 m² 的住宅用电每户容量宜不小于 8 kW。

某供电公司在供电方案中测算小区负荷时一般根据每套建筑面积大小 50 m²、90 m²、144 m² 以下,分别取 4 kW、6 kW、8 kW,同时系数取 0.3 ~ 0.4;商业按 60 W/m²、车库及设备房按 10 W/m² 测算,同时系数取 0.7;小区道路按装机计算,同时系数取 0.7;消防、电梯等负荷按最大用

电需量进行测算。这样算出总计算负荷后,再根据每栋建筑的计算负荷,按照单元选择标准变压器;变压器的容量一般为计算负荷的 75% ~ 80%。由于同时系数选择的随意性较大、变压器容量选择偏保守,所以在实际中,主要表现出新建小区变压器配置偏大、配电网负载率低;由于变压器多数安装在地下车库内,在当前地下车位价格高涨的情况下,供电公司 与 开 发 商 的 矛 盾 突 出。

由于 OPEN3000 调控系统、SG186 营销系统能储存多年运行数据,因此利用“大数据”方法,从 OPEN3000 系统、SG186 系统中提取用户数据,对某地级市多个大型居住小区多年用电负荷进行了统计,分析其增长特性、最大负荷率,进而与原供电方案中计算负荷的比例关系进行了对比分析,考察计算负荷选取是否适当,电网规划与配电网建设进度如何与负荷增长相匹配,以期对电网规划、供电方案批复起到决策参考作用。

选择了金山城、南亚小区、棕榈湾小区、世纪滨江、长城大厦等专线用户,主要在于上述专线用户数据全面、真实准确。在数据收集过程中还收集了其他专线用户,因数据量小、时间跨度短,而没有纳入分析。对这些专线用户最大负荷与平均负荷变化情

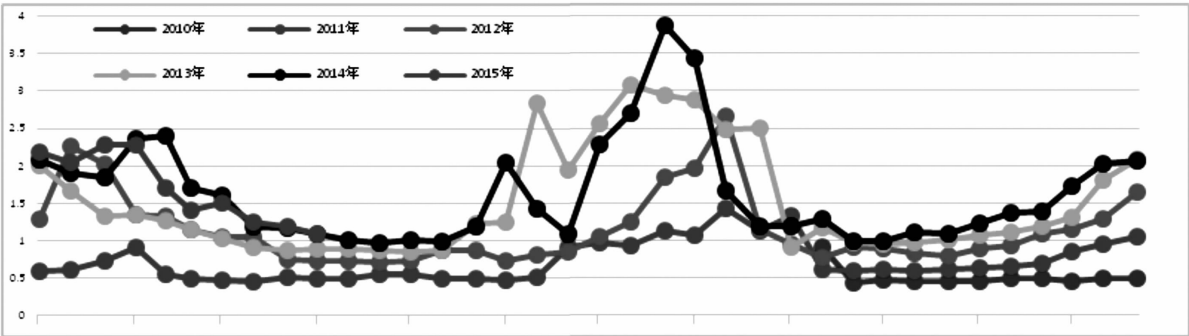


图 1 金山城小区日最大负荷

况绘制年度曲线,从曲线的变化趋势中查找规律。上述“平均负荷”指每日 96 点采样负荷的算术平均值。由于数据量较大,在数据处理中,为便于观测,对全年日数据按旬取最大值,起到平滑数据作用。

1 小区负荷增长趋势

1.1 金山城小区日最大负荷

用户“金山城”小区 12 台配电变压器共 10 700 kVA,短期挂接天成小区临时施工用电 630 kVA;共 3 495 户,2009 年年底投运。金山城小区日最大负荷如图 1 所示。

1.2 金山城小区秋季最大负荷

金山城小区秋季最大负荷如图 2 所示。

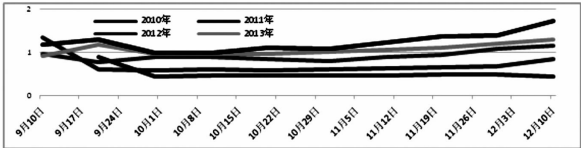


图 2 金山城小区秋季最大负荷

1.3 小区负荷发展特点

同理,可以绘出南亚小区、棕榈湾小区、世纪滨江、长城大厦等 4 个小区日最大负荷、秋季最大负荷增长曲线,找出小区负荷发展特点:

- 1) 年最大负荷、平均负荷呈现逐年增长。
- 2) 6 月中旬至 9 月中旬为负荷较大月份,日最大负荷波动较大,最大负荷一般出现在 8 月上、中旬;9 月中旬至 12 月上旬负荷呈现线性稳定增长;12 月中旬开始负荷会有迅速抬升,并在 1 月下旬至 3 月中旬间出现不规则波动;3 月中旬至 6 月中旬负荷下降呈现线性稳定,增长不明显。秋季负荷呈现线性稳定增长,与气温、节假日关系不大。
- 3) 长城大厦 2001 年投运,除 2008 年负荷较低外,2009 年以后,长城大厦负荷稳定,不再有增长。

2 实际负荷与计算负荷关系

2.1 年度最大负荷与计算负荷占比

统计各小区实际负荷与供电方案中计算负荷间的比例关系,可以考察计算负荷选取是否适当,电网规划与配网建设进度如何与负荷增长相匹配。

表 1 各小区年度最大负荷与计算负荷占比平均值

年度最大 负荷与计 算负荷 占比	投运年	第一年	第二年	第三年	第四年
平均值	12.78%	19.69%	31.06%	40.69%	54.37%

4 个小区的负荷增长显示了高度的一致性,即最大负荷与计算负荷相比,在投运后第一年达到约 20%,第二年 30%,第三年 40%,第四年接近 60%,见图 3。

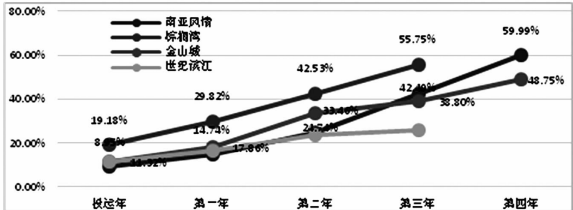


图 3 各小区年度最大负荷占比

长城大厦于 2001 年投运,仅收集到 2008 年及以后数据,此时用户已运行 7 年,除 2008 年负荷较低外,2009 年以后,长城大厦负荷稳定,不再有增长。且长城大厦的最大负荷仅占计算负荷的 67%。

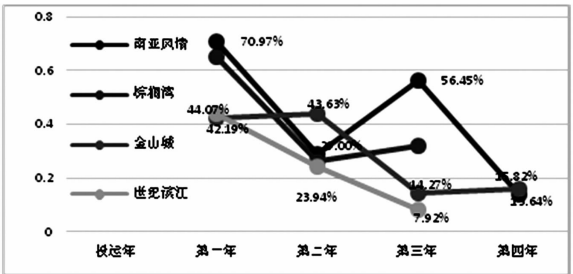


图 4 各小区秋季最大负荷环比增长率

因此认为小区负荷达到计算负荷的 70% 即是一个可信的上限。这是因为从秋季最大负荷的环比增速看,负荷环比增长逐年下降,可以直观地看出负荷增长潜力,间接地体现了入住率增长变化趋势,见图 4。可以预见到第五年入住率完成,负荷不会有大的增长。

表 2 各小区秋季负荷环比增长率平均值

秋季最大 负荷环比 增长率	投运年	第一年	第二年	第三年	第四年
平均值		55.59%	30.64%	27.68%	14.73%

2.2 秋季负荷与计算负荷占比

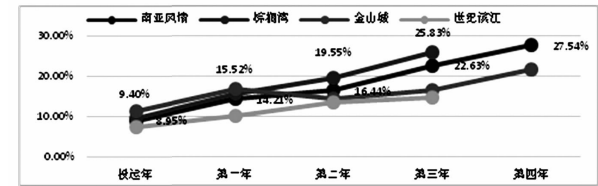


图 5 各小区秋季最大负荷占比

从秋季稳定负荷与计算负荷占比的情况,可以直观地看出基础负荷增长及其与计算负荷间的比例关系。目前看来第四年负荷占比接近 30%,这反映了配电线路的长时负荷水平,见图 5。

3 结 论

1)某市大型住宅小区 6 月中旬至 9 月中旬为负荷较大月份,日最大负荷波动较大,最大负荷一般出现在 8 月上、中旬;9 月中旬至 12 月上旬负荷呈现线性稳定增长;1 月下旬至 3 月中旬间出现不规则波动;3 月中旬至 6 月中旬负荷下降呈现线性稳定,增长不明显。

2)某市大型住宅小区年最大负荷、平均负荷呈现逐年增长。年最大负荷与计算负荷相比,在投运后第一年达到约 20%,第二年 30%,第三年 40%,第四年接近 60%。在第五年达到可信的最大负荷,为计算负荷的 70%。小区配电线路的长时负荷水平为计算负荷的 30%。

3)某市在制定供电方案时,变压器容量的选择一般为计算负荷的 1.33 ~ 1.25 倍(1/75%) ~ (1/80%),实际小区变压器整体容量选择的统计结果为 1.35 倍,因此总体装机规模偏大。

表 3 各小区装机与计算负荷比

小区	计算最大负荷 /kW	供电容量 kVA	装机/计算负荷
南亚	1 900	4 160	2.189
棕榈湾	1 564	2 880	1.841
金山城	7 950	10 700	1.346
金山一品	11 953	16 660	1.394
世纪滨江	12 508	16 400	1.311

4)实际工作中,由于缺乏完整的负荷数据,当谈及某建成小区负荷时,基层技术员往往用装机数量来替代,这是概念性替换。可以用装机的 52% 来估计已建小区的最大负荷(1/1.35 × 0.7)。

5)长城大厦的负荷由 2008—2010 年的 60% 计算负荷下降到 2011—2014 年的计算负荷 50%,这可能与大厦底层商场的歇业有直接关系,也提示小区中大体量的商场负荷对整体负荷有较大影响。对大型城市综合体,例如北京华联、万达广场的负荷特性需要持续跟踪,以掌握大体量的商场负荷特点及其对大型城市综合体负荷影响情况。

6)负荷数据主要来自 OPEN3000 系统,当用电采集覆盖率达到 100%,采集成功率达到 99.5% 以上时,可以对小区的商业、住宅负荷进行更精确的分类统计,以实现分类最优供电方案。

7)居住建筑的单位建筑面积负荷大小与建筑性质、所处城市位置、当地经济发展水平、供电条件、家庭能源消费构成、家庭收入与消费水平、气温降水等条件相关,因此不能孤立地静态地考虑当地负荷水平。上述确立的方法有助于跟踪统计分析当地负荷实际水平,并与历史测算数据进行比较,以应用于电网规划和新建小区的负荷预测。

参考文献

[1] GB/T 50293 - 2014,城市电力规划规范[S].
[2] JGJ 16 - 2008,民用建筑电气设计规范[S].
[3] 国家电网公司业扩供电方案编制导则[S]. 2010.

作者简介:

胡春华(1975),硕士、高级工程师,研究方向为电网运营监测、电网规划;
程淑英(1973),高级工程师,研究方向为电网运营监测、电网运行管理;
王 宇(1981),工程师,研究方向为电网运营监测、电网运行数据分析。

(收稿日期:2015 - 11 - 02)

基于 Dig SILENT 的风电场并网暂态稳定分析与比较

杜旭浩, 马天祥, 魏力强, 孙翠英
(国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要:随着大型风电场的不断投入,其并网暂态稳定问题,也受到人们的关注。基于 Dig SILENT 仿真平台,分别建立了含有双馈和永磁同步直驱两种不同风力发电机组的电网仿真计算模型。结合某风电场的接入实例,模拟了 A 市电网发生 $N-1$ 三相短路故障时,两种不同风力发电机组的暂态稳定情况,并对仿真结果进行了分析比较,给出了参考建议。

关键词:风电场并网;暂态稳定; $N-1$;双馈;永磁直驱

Abstract: With the continuous integration of large-scale wind farms with the grid, the transient stability problem caused by grid connection is attracted more and more attention. Based on Dig SILENT, the simulation model of power grid is established containing two kinds of different wind power generation units, that is, double-fed and permanent magnet direct drive. According to an integration example of a wind farm, the transient stability of these two kinds of wind power generation units is simulated during $N-1$ three-phase short-circuit fault. The simulation results are analyzed and compared, and the reference suggestions are given.

Key words: grid-connected wind farm; transient stability; $N-1$; double-fed; permanent magnet direct drive

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0081-03

0 引言

随着风电技术的不断研究和发展,中国风电产业逐渐走向规模化,然而大型风电场接入电网会对系统的安全稳定运行带来影响,尤其是系统的暂态稳定问题^[1]。当系统发生大扰动时,大容量的风电场应尽量避免简单的切机措施,采取提高故障穿越能力等措施,为系统的暂态稳定提供支撑^[2]。

为了考察电网发生大扰动期间,风电场保持并网运行的能力,基于 Dig SILENT 仿真平台,建立了含有风电场的电网仿真计算模型。模拟了 A 市电网发生 $N-1$ 三相短路故障时,风电场并网公共连接点 PCC 点的母线电压以及有功、无功出力的变化情况,并对风电场采用双馈和永磁同步直驱两种不同风力发电机组并入电网时的情况,进行了分析比较,给出了恰当的建议,对今后的风电场入网暂态稳定研究及其他同类型机组的通流试验研究有一定实际意义。

1 风力发电系统建模

基于定子通流及转子通流试验的原理及方法,

选取 Dig SILENT 仿真平台,分别建立双馈和永磁同步直驱两种风电机组模型,并与电网相连接,形成含有风电场的电网计算模型。

1.1 双馈风力发电系统

双馈风机的通用结构如图 1 所示,风机采用变桨距控制,可以追踪最大风能,提高风能利用率;定子绕组并网,转子侧通过变频器并网,可对有功和无功进行控制^[3]。双馈风力发电系统运行时可实现能量双向流动,当风机运行在超同步速度时,功率从转子流向电网;而当运行在次同步速度时,功率从电网流向转子^[4]。

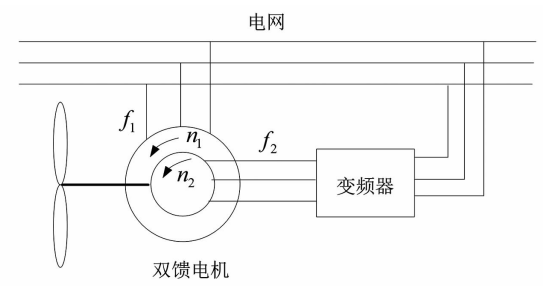


图 1 双馈电机风力发电系统

以 Dig SILENT 软件建模,由于该软件中定子磁链可直接从电机模型输出结果中获取,因此可直接取用定子磁链矢量。需将转子 dq 坐标系下的转子电流 i_{dr} 、 i_{qr} 转换到定子磁链坐标系上。首先将转子

电流 i_{dr} 、 i_{qr} 转换至两相同步静止坐标系 ($x-y$ 坐标系) 下:

$$i_{xr} = i_{dr} \cos \theta_r - i_{qr} \sin \theta_r$$

$$i_{yr} = i_{dr} \sin \theta_r + i_{qr} \cos \theta_r$$

(1)

然后从两相同步静止坐标系下转至两相同步旋转坐标系 ($m-t$ 坐标系), 即定子磁链坐标系下:

$$i_{mr} = i_{xr} \cos \theta_s + i_{yr} - \sin \theta_r$$

$$i_{tr} = -i_{xr} \sin \theta_s + i_{yr} \cos \theta_r$$

(2)

式中: θ_s 为磁链同步角, 它是从定子轴 x 轴到磁链轴 m 轴的夹角; θ_r 为转子位置角, 它是转子坐标系 d 轴与定子 x 轴之间的夹角。同步旋转坐标系 m 轴固定在磁链矢量上, t 轴超前 m 轴 90° , 该坐标系和磁链矢量一起在空间以同步角速度旋转。

同时采用电流闭环控制抑制交叉耦合项的干扰, 由此可得双馈电机转子侧矢量控制的模型, 如图 2 所示。

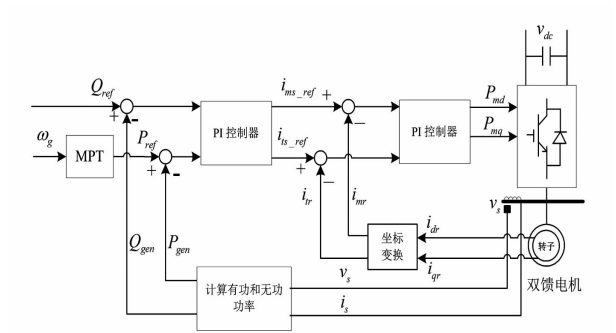


图 2 双馈电机转子侧控制模型

电网侧变频器经滤波电感后并网, 以网侧电压 V_s 作为 d 轴, 实现 dq 的解耦控制, 通过控制注入电网侧有功电流 i_d 和无功电流 i_q , 即可实现对有功功率和无功功率的解耦控制, 控制模型如图 3 所示。

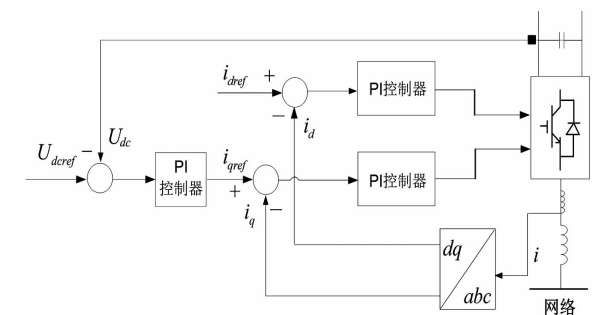


图 3 双馈电机电网侧变频器控制模型

1.2 永磁同步直驱风力发电系统

永磁同步直驱风力发电系统通用结构如图 4 所示, 通过两个全功率变频器与电网相连^[5]。变频器可将频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能, 风机原动侧也采用最大风能跟踪, 其基本原理

同双馈风力发电系统相同^[6]。

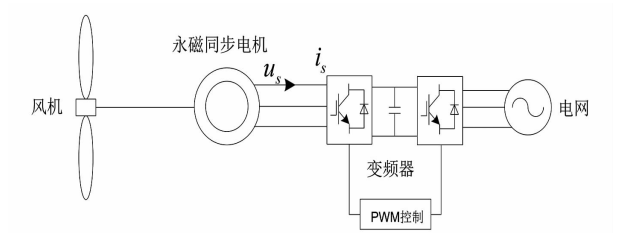


图 4 永磁同步直驱风力发电系统

发电机侧变频器, 以发电机母线处电压作为 d 轴作坐标变换, 实现 dq 分量的解耦控制。通过矢量控制的方法, 实现同步发电机的有功功率和无功功率的解耦控制, 控制目标为有功功率按照最优功率曲线变化, 同时保持与发电机无功交换为零, 如图 5 所示。

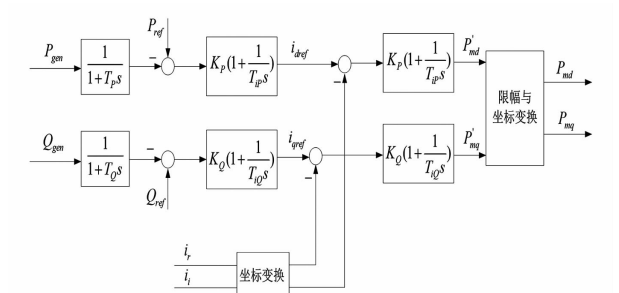


图 5 永磁风机电机侧变频器控制模型

电网侧变频器, 以并网侧母线电压作为 d 轴实现有功功率与无功功率的解耦, 以控制直流电压在设定值为目标, 同时保持变频器与电网交换的无功功率按指定的功率因数变化, 也就是恒功率因数控制, 如图 6 所示。

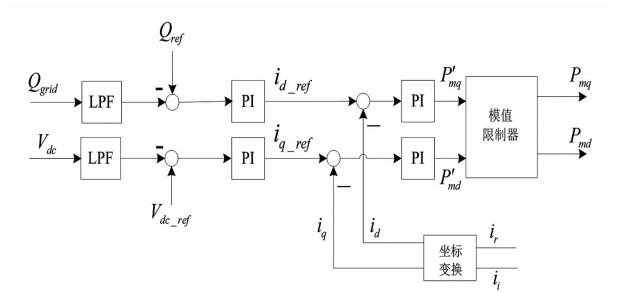


图 6 永磁风电网侧变频器控制模型

2 仿真分析

风电场内部风机通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处, 35 kV 母线经过升压变压器接至系统 220 kV 侧母线。对 A 市电网的部分线路进行故障仿真计算, 校验 $N-1$ 条件下接入大型风电场后的该市电网暂态稳定情况, 分析大型风电场对

该市电网稳定性的影响;并对双馈风电机组和永磁同步直驱风电机组的暂态稳定性进行分析比较。

仿真计算流程如下:根据 A 市电网 2014 年基础数据,按照规划容量 48 MW 接入风电场,分析区域内某 220 kV 线路发生三相短路故障下,风电场 PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况。

2.1 双馈风机接入的暂态仿真分析

软件中设置单台双馈风机容量为 2 MW,每 8 台为 1 组,共 3 组通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处,其保护设定如表 1 所示。

表 1 双馈风电机组保护设置

保 护	整定值	动作延时/s
过电压保护/(p. u.)	1.1	0.1
	1.2	0
低电压保护/(p. u.)	0.8	0.2
	0.6	0.1
过转速保护/(p. u.)	1.2	0.1
	1.3	0
低转速保护/(p. u.)	0.7	0.1
	0.6	0
转子过流保护/kA	5	0.5

在 PCC 点邻近的某 220 kV 单回线路 50% 处设置发生三相短路故障,故障由第 0.1 s 发生,故障发生后 0.1 s 后单回线路断开。PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况输出曲线如图 7 ~ 图 9 所示。

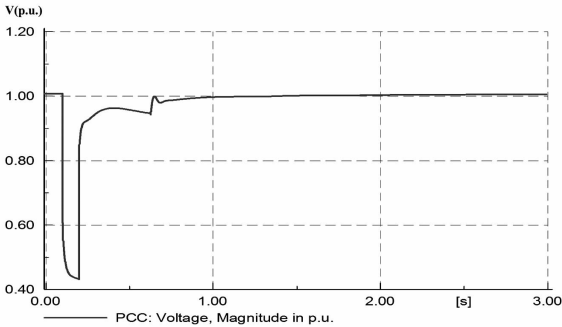


图 7 双馈风机接入风电场 PCC 点母线电压

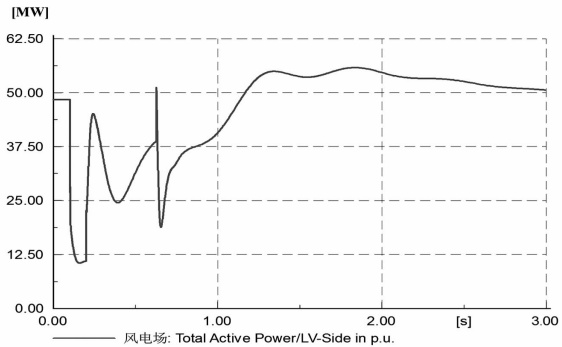


图 8 双馈风机接入风电场有功出力变化

在故障发生后,PCC 点母线电压有所降低,随着故障线路的切除,母线电压能够快速恢复至故障前水平,系统保持稳定。但是由于故障距离风电场较近,风电场有功和无功出力波动较大。故障期间,没有出现暂态电压失稳情况,风电场没有进行切机保护动作。

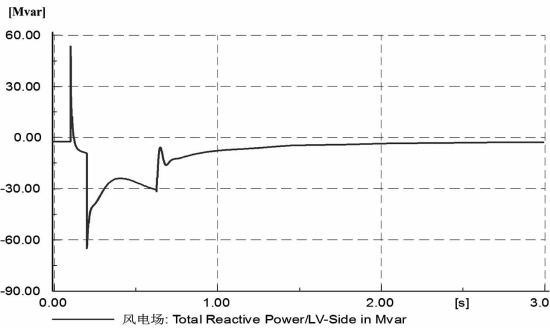


图 9 双馈风机接入风电场无功出力变化

2.2 永磁同步直驱风机接入的暂态仿真分析

软件中设置单台永磁同步直驱风机容量也为 2 MW,每 8 台为 1 组,共 3 组通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处,其保护设定如表 2 所示。

表 2 永磁同步直驱风机机组保护设置

保 护	整定值	动作延时/s
过电压保护/(p. u.)	1.2	0.1
低电压保护/(p. u.)	0.6	0.1
高频保护/Hz	50.4	0.1
低频保护/Hz	49.6	0.1

故障设置同双馈风机,PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况输出曲线如图 10 ~ 图 12 所示。

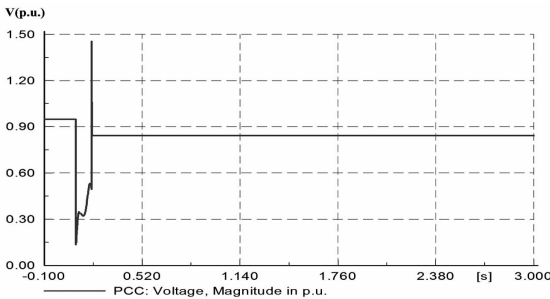


图 10 永磁同步直驱风机接入风电场 PCC 点母线电压

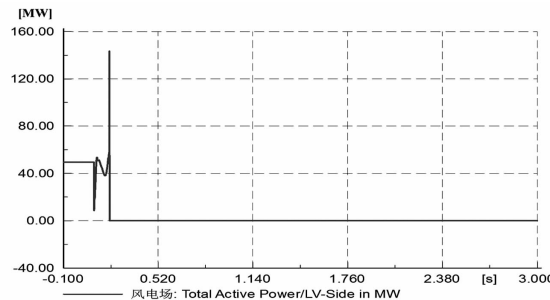


图 11 永磁同步直驱风机接入风电场有功出力变化

(下转第 94 页)

并网型储能系统充放电仿真分析

徐新泉,徐立亮,胡仁祥,张毅,王明慧,赵亚楠
(国网吐鲁番供电公司,新疆 吐鲁番 838000)

摘要:储能系统被广泛应用于风电、光伏等间歇性新能源发电中平抑出力波动。针对新能源系统充放电对储能系统控制单元稳定运行的要求,搭建了一种基于 DC/AC 变换器和双向半桥 DC/DC 变换器的控制系统。首先采用状态空间法建立了储能系统充放电控制的数学模型,然后基于此数学模型,详细分析了该控制器的工作原理及电流闭环反馈的控制方法,最后在 Matlab 仿真系统中验证了理论分析的正确性。

关键词:储能系统;闭环反馈控制;状态空间法

Abstract: Energy storage systems are widely used in power generation by the intermittent new energy sources such as wind power, photovoltaic etc to smooth the output fluctuations. Aiming at the requirements for stable operation of control unit in energy storage system by the charging and discharging of new energy system, the control system based on DC/AC converter and two – way half bridge DC/DC converter is proposed. The mathematical model to control charging and discharging of energy storage is established with state space method. And then the working principle of the controller and the control method of current closed – loop feedback are analyzed in detail based on the proposed mathematical model. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified in Matlab simulation.

Key words: energy storage system; closed – loop feedback control; state space method

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0084 – 04

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展以及风电等间歇性能源大力并网的需求,储能系统以其较强的灵活性等优点逐渐被应用到电力系统中。随着储能技术的不断成熟,大规模的风电、光伏等清洁能源完成了友好并网。目前储能系统主要可以通过以下两种方式接入电网中:1)直接通过双向 AC/DC 变换器接入电网;2)通过 AC/DC 和双向 DC/DC 两级变换器接入电网^[1-2]。文献[3-5]采用状态空间平均法建立了超导储能系统用斩波器充放电的数学模型,并搭建了试验系统,但没有考虑充放电时交流侧功率因数的变化,在实际运用中有一定的局限性。下面将结合充放电时交流侧功率因数的变化情况,进行储能系统的充放电控制研究。

储能系统通过能量转换系统(power conversion system,PCS)接入到配电网中,PCS 可以实现电网与储能系统之间的能量转换,从而可以达到储能系统充放电的目的。下面对能量转换系统进行了研究,

分析了基于储能系统的斩波器充、放电的基本工作原理,建立了斩波器的数学模型,并设计了电流闭环控制策略。

1 储能系统拓扑结构图

将储能系统和 PCS 通过组合可以控制储能系统的充放电。该控制系统由变流器和两相限斩波器组成。储能系统接入电网结构图如图 1 所示^[4],图中 U_a 、 U_b 、 U_c 分别是电网三相电压,VSC 由交替导通的 6 个桥臂管构成,斩波器由 2 个 IGBT 管构成。

1.1 DC/AC 变流器

在储能系统中 DC/AC 变流器采用三相电压型 PWM 模型,其拓扑结构如图 2 所示。通过 PWM 在逆变与整流两种工作状态之间的切换实现储能系统的充放电。当变流器工作在逆变状态时,储能系统向电网提供能量;变流器工作于整流状态时,储能系统从电网吸收能量。对于 DC/AC 变流器采用外环电压内环电流的双闭环控制模式,外环电压控制环主要用于直流电压的控制,内环电流环对电流变化

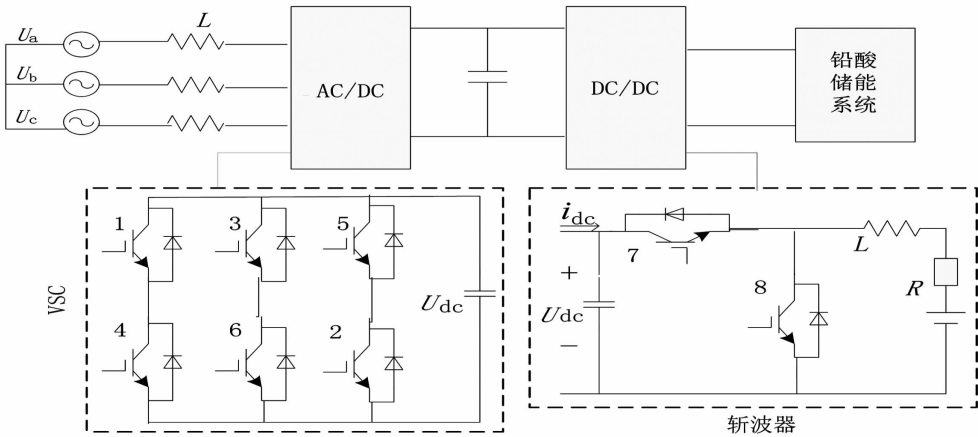


图 1 储能系统接入电网结构图

值进行快速的跟踪控制^[5]。

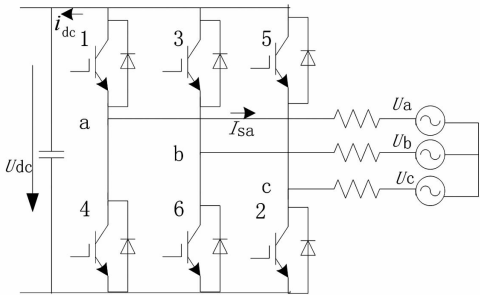


图 2 AC/DC 变换器图

根据电路学原理可以推导出 VSR 在三相静止坐标系下的数学模型,通过坐标转换的原理可以等效出 VSR 在 dq 坐标下变流器的数学模型,这样省去了考虑频率变化的麻烦。 dq 坐标下变流器的数学模型可以用式(1)表示:

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + V_d \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + V_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 U_q 是电网电动势的 d 、 q 轴分量; V_d 、 V_q 是三相 VSR 交流侧电压的 d 、 q 轴分量。

从式(1)可以看出, d 、 q 分量之间并没有解耦,为了便于控制器模型的搭建,此处采用前馈解耦的控制方法使得 d 、 q 分量之间达到解耦的目的。当电流环节采用 PI 调节器之后, V_d 、 V_q 解耦之后的关系式可以用式(2)表示^[6]:

$$\begin{cases} V_q = - \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{q-ref} - i_q) + L i_d + u_q \\ V_d = - \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{d-ref} - i_d) + \omega L i_q + u_d \end{cases} \quad (2)$$

经过式(2)可以看出, d 、 q 分量之间达到了解耦

控制,由式(2)可以得到电流内环的控制策略如图 3 所示。

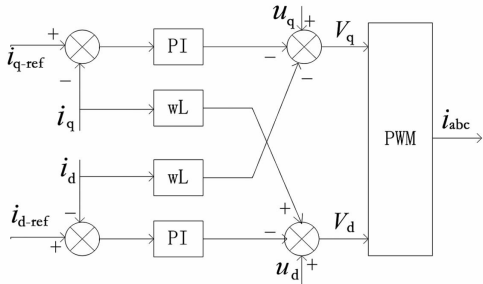


图 3 电流内环解耦控制图

1.2 斩波电路

当斩波器对储能系统进行充放电时,PWM 变流器控制直流环节的电容电压处于稳定运行状态^[7-8]。当 VT7 导通,VT8 关断时,斩波器处于 Buck 状态对储能系统充电;当 VT7 关断,VT8 导通时,斩波器处于 Boost 状态对储能系统开始放电。

充电状态时的数学模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_l}{dt} = - i_l R - u + u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_l \end{cases} \quad (3)$$

放电状态时的数学模型如式图(4)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_l}{dt} = - i_l R - u - u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} + i_l \end{cases} \quad (4)$$

DC/DC 变换部分采用双向 DC/DC 变换器,实现储能系统的充放电。当储能系统电量不足时,通过控制 DC/DC 变换器使得系统处于充电运行状态。在充电状态时,DC/DC 变换器中 VT7 和 D8 构成回

路,变换器处于 Buck 运行状态;放电状态时,DC/DC 变换器中 VT8 和 D7 构成回路,变换器处于 Boost 运行状态。在变流器工作的过程中,通过 PWM 控制 IGBT 的触发信号可以调节变换过程中的电流与电压,使其达到系统所需值。斩波电路的控制系统如图 4 所示^[9-10],图中,PWM 开关频率为 2 000 Hz,PI 控制器的参数为: $K_p=0.16$; $K_i=9.35$ 。

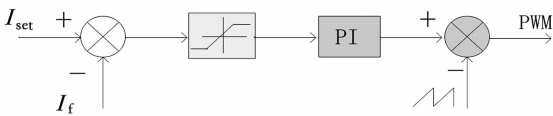


图 4 斩波电路控制图

在储能系统的充放电过程中,采用电流闭环的控制模式。通过电流给定值与反馈值的差值经过 PI 控制器计算斩波器的占空比,利用电流反馈值控制 VT7 和 VT8 交替导通,从而控制储能系统的充放电。

2 仿真实验

为了验证变换器设计的准确性,在 Matlab 软件中搭建了储能系统的充放电仿真模型,网测电压为 380 V,电路频率取为 50 Hz。为了简化模型的搭建,储能系统采用电压源与电阻的串联体代替。图 5 是储能系统充放电的仿真模型图。

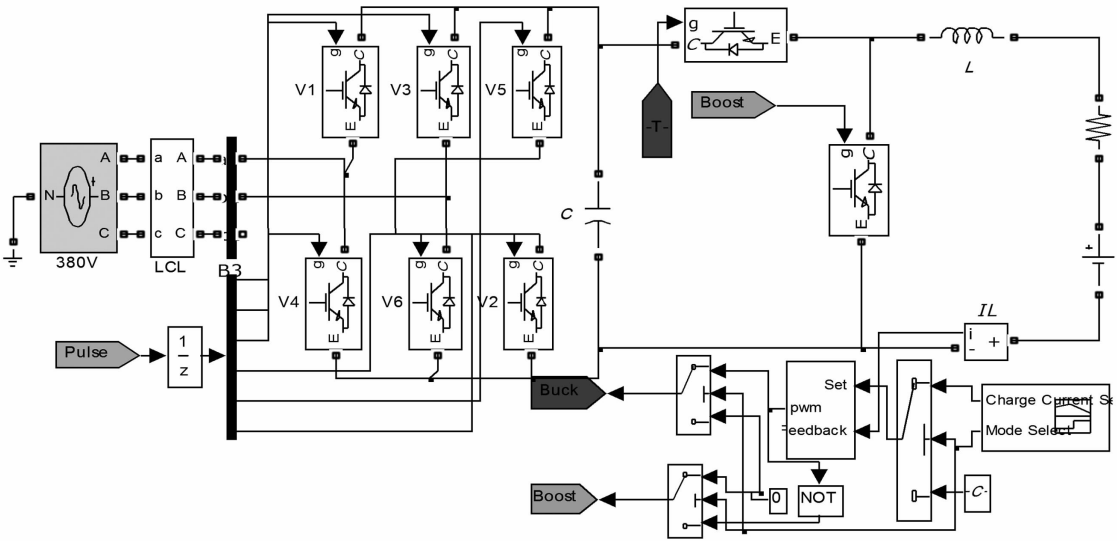


图 5 储能系统充放电模型

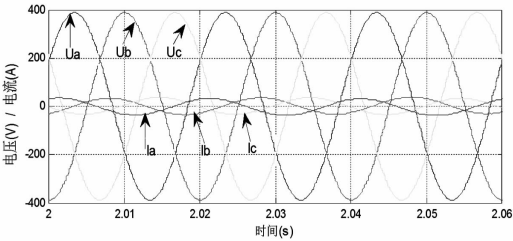


图 6 充电时网测功率因数图

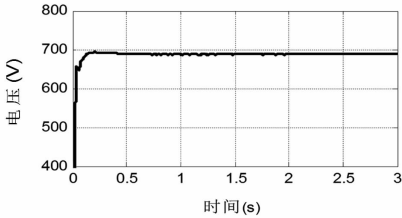


图 8 储能系统放电时直流母线电压波形

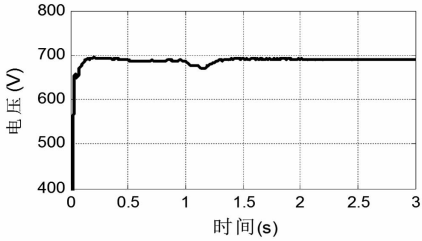


图 7 负载变化时直流母线电压波形

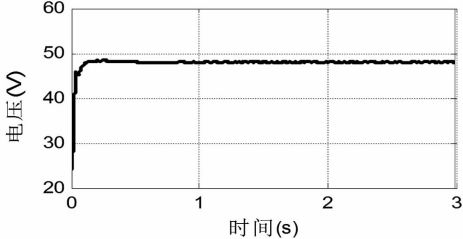


图 9 储能系统充电时直流母线电压波形

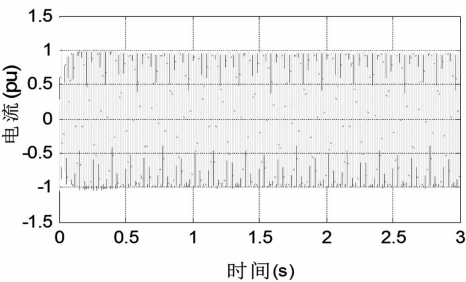


图 10 负载恒定时交流侧电流波形

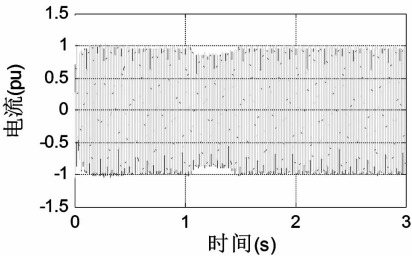


图 11 负载变化时交流侧电流波形

图 6 是储能系统充电时整流器侧电流、电压波形,可见二者相位基本一致,满足网侧功率因数为 1 的要求,并网电流达到了快速跟踪电压变化的效果,且电流正弦度较好。图 7 是储能系统放电过程中负载发生时,直流母线电压波动图。从图 7 可以看出充放电模型可以稳定直流母线电压的稳定性,从而可以实现储能系统的正常充放电。图 8 是储能系统处于放电状态时的直流母线电压波形图,从图 8 可以看出放电电压可以很快达到直流母线电压 690 V,并且可以稳定在此值,电压波动范围小,从而提高了储能系统的使用寿命。图 9 是储能系统处于充电状态时的直流母线电压波形图,从充电波形图可以看出,储能系统可以通过双向 DC/DC 变换器快速充电,在瞬间就可以达到其充电电压,且电压波动范围较小,从而提高了系统的可靠性。图 10 是负载恒定时交流侧电流数值变化波形,图 11 是负载变化时交流侧电流变化波形图,由图 11 可以看出,在负荷发生波动时,交流侧的电流值也会发生响应的变化。

3 结 论

提出了基于能量转换系统的储能系统充放电控

制策略,分析了 DC/AC 变流器、直流斩波电路的基本原理,并建立了其数学模型及提出了电流闭环反馈控制方法。仿真结果表明:能量转换系统可以实现储能系统的充放电,保证充放电实现了单位功率因数运行,网侧电流正弦化。从充放电电压波形图可以看出:储能系统充放电响应速度很快,且超调量较小,从而证明了充放电控制策略具有较好的动态性能,为储能系统充放电提供了稳定、可靠的电源。

参考文献

[1] 张耀,陈息坤,杨胜. 锂电池化成双向 AC/DC 变换器研究[J]. 电工电能新技术, 2014(8):32-37.

[2] 刘月贤,王天钰,杨亚宇,等. 电动汽车充放电系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42 (13): 70-76.

[3] 杨斌,诸嘉慧,郭云峥,等. 高温超导磁储能用斩波器仿真及试验[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12):51-54.

[4] 李辉,季海婷,付博,等. 含 DC/DC 变换器全钒液流电池储能系统安全充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2013,37(24):7-11.

[5] 李武峰,罗小英,边孝成,等. 电动汽车蓄电池充放电装置研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(8):89-91.

[6] 张兴,张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社 2012.

[7] 李永东. 现代电力电子学——原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社 2011.

[8] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[9] 高雪松,张相军. 基于超级电容的双向 DC-DC 变换器软开关控制分析[J]. 电气传动, 2013(s1):82-86.

[10] 郭熠. 电动汽车双向 DC/DC 变换器的研究[D]. 天津:天津大学, 2004.

作者简介:

徐立亮(1990),硕士研究生,从事电网运行工作。
(收稿日期:2015-11-09)



欢迎订阅 欢迎投稿

高温再热器 Super304H 与 T91 异种钢 接头开裂失效分析

蔡志强,林雪松,邓永龙,落志祯
(四川省电力工业调整试验所,四川 成都 610072)

摘 要:对国内首台 600 MW 循环流化床锅炉外置床内的高温再热器 Super304H 与 T91 异种钢接头开裂进行了失效分析。分析结果表明开裂原因为结构设计不当,该管段不能自由膨胀;加上该焊接接头熔合区存在界面突变,容易引起应力集中,在高温环境下长期运行后,抗高温蠕变性能较差 T91 侧出现蠕变孔洞,在熔合区形成蠕变裂纹;因此最终发展为宏观裂纹而失效。根据分析结果,提出将该异种钢接头布置在密封盒上方,且增加接头至联箱之间管程弯头数量的整改方案。

关键词:循环流化床;异种钢接头;失效分析;设计不当;蠕变孔洞;应力集中

Abstract: Failure analysis for the cracking of Super304H and T91 dissimilar steels welded joint of high – temperature reheater in external heat exchanger is carried out in the first 600 MW circulating fluidized bed (CFB) boilers in China. The analysis results show that the cracking reason is the improper structure design, and the section cannot expand because of that wound. Coupled with the existing mutation interface in weld bead boundaries where exist stress concentration, the T91 with poorer high – temperature creep resistant properties would firstly generate creep cavity under high temperature after running for a long time, and then the creep crack is occurred, which finally leads to creep failure. According to the analysis result, the improved scheme is proposed, that is, the arrangement of dissimilar steels welded joint will be decorated above the seal box and the number of elbow between the joint and the header should be increased.

Key words: circulating fluidized bed (CFB); dissimilar steels welded joint; failures analysis; improper structure design; creep cavity; stress concentration

中图分类号:TK223.3 文献标志码:B 文章编号:1003 – 6954(2016)02 – 0088 – 03

引 言

随着火力发电站向超超临界机组发展,由于温度和压力等高参数的影响,锅炉受热面对材质的要求越来越高,具有高热强性和高抗氧化性的铬镍奥氏体不锈钢(Super304H)及马氏体耐热钢(T91)便大量出现在锅炉受热面的高温高压段,因此就难免出现该两类钢种的异种焊接问题^[1-2]。但由于这两类钢的化学成份、金相组织、机械性能及热膨胀系数存在较大差异,焊材的选择又通常是采用低匹配原则,容易导致在焊接接头两侧的熔合区产生较为复杂的金相组织及化学成分的不均匀性,使焊接接头在使用过程产生过早失效^[3]。

国内首台 600 MW 超超临界循环流化床机组自 2013 年 4 月 168 h 试运行通过后至今,两侧外置床内靠近高温再热器出口联箱的高温再热器出口管段管屏发生 3 次多处异种钢接头开裂,开裂的接头位

于密封盒内,接头距离上部高温再热器出口联箱管程大约为 1.5 m,且仅设计了一处 145°弯头作为膨胀伸缩量。该异种钢接头材质为 SA – 213T91/Super304H,规格为 $\Phi 44.5 \times 5.0/\Phi 44.5 \times 7.0$,开裂位置均位于 T91 管一侧。针对该开裂的异种钢接头进行了宏观检查、化学成分分析、力学性能试验、金相组织检测、扫描电镜分析及显微硬度测试等研究,以确定该异种钢焊接接头裂纹产生的根本原因。

1 试验方法与结果

1.1 宏观检查

图 1 为异种钢接头管段裂纹内外壁开裂宏观形貌图,发生开裂的位置均位于 T91 管侧与接头的熔合区。从外壁整体形貌看,裂纹沿管子周向扩展,约占整个圆周的一半,与焊道几乎平行,距离焊趾约 5 mm,基本上位于焊缝热影响区。经剖开内壁观察,裂纹已贯穿整个壁厚,内壁裂纹距离焊缝根部约 8 mm,整体上

表 1 T91 侧化学成分

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Al	N
试样	0.091	0.38	0.40	0.008	0.005	8.74	0.95	0.07	0.21	0.10	0.008	0.050
ASME	0.08 ~ 0.12	0.20 ~ 0.50	0.30 ~ 0.60	≤0.020	≤0.010	8.00 ~ 9.50	0.85 ~ 1.05	≤0.40	0.18 ~ 0.25	0.06 ~ 0.10	≤0.040	0.030 ~ 0.070
允许偏差 /wt%	±0.01	±0.05	±0.03	+0.005	+0.005	±0.10	±0.05	±0.03	±0.03	±0.05	+0.01 -0.005	±0.01

观察,裂纹应为从内向外扩展。通过对内壁接头观察,发现在 T91 侧与接头过渡区并非平整过渡,而是存在明显的界面差。

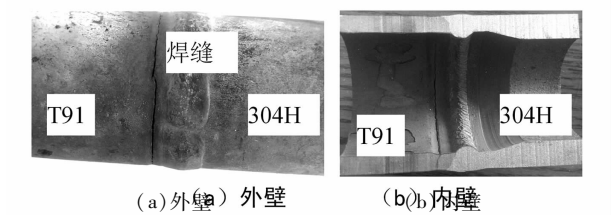


图 1 管子内外管壁裂纹宏观形貌

1.2 成分分析

由于多次发生开裂的位置均发生在 T91 管一侧,Super304H 管侧与焊缝接头接触处并未发生开裂情况,因此只需对管段上的 T91 母材进行取样分析,元素化学分析结果见表 1。

检测结果表明,T91 管侧截取的试样各元素成分含量满足 ASME 中对 T91 材料的成分要求,因此可以排除是由材质误用导致的开裂。

1.3 力学性能试验

在开裂的管段 T91 管材一侧截取纵向试样进行拉伸试验分析。为了能更好地进行对比分析。将未开裂的邻近管段试样以及备品试样分别进行拉伸试验,检测结果见表 2。

表 2 拉伸试验结果			
	Rm /MPa	R _{p0.2} /MPa	A /%
开裂试样	535	330	21.0
未开裂试样	545	345	21.5
备品试样	610	445	22.5
ASME 标准	585	≥415	≥20

检测结果显示,备品试样的拉伸试验的 3 项力学性能指标均满足 ASME 标准的相关要求,但开裂试样与临近管段试样的 T91 侧母材除延伸率满足要求外,抗拉强度与屈服强度均明显低于标准要求。

1.4 金相组织检测与显微硬度测试

对图 1(b)中的试样的裂纹区域、远离裂纹 40 mm 区域以及备品试样(T91 母材)分别进行金相组

织检测。

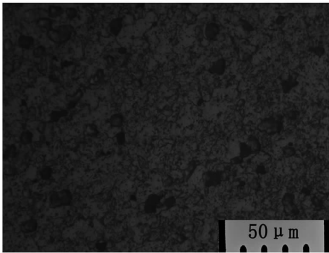


图 2 裂纹附近金相组织

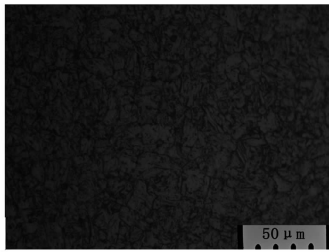


图 3 远离裂纹处 T91 组织

通过金相组织观察,发现在裂纹两侧附近(即焊缝热影响)均存在大量的蠕变孔洞,且大部分沿管子纵向方向呈链状分布;裂纹附近马氏体位相已不明显,碳化物弥散析出,并聚集长大,金相组织基本上接近于铁素体+碳化物。远离裂纹处 T91 母材侧金相组织为回火索氏体,亦发现大量析出碳化物颗粒,但几乎未发现蠕变孔洞。对 T91 管材备品试样金相检测,材料的组织为典型的回火马氏体组织,未发现明显的碳化物析出和蠕变孔洞等异常情况。

对裂纹附近区域按图 4 测点分布进行维氏硬度检测,即从裂纹边缘起向 T91 母侧等距离均匀取 5 个点,每个点沿厚度方向打 3 个硬度取其平均值,检测结果见表 3。

表 3 显微硬度值					
测点	1	2	3	4	5
平均硬度值 /HV	149	150	162	165	173

显微硬度检测结果表明,裂纹附近区域硬度相比备品试样硬度整体偏低,且越靠近裂纹处(熔合线),硬度值总体呈下降趋势。

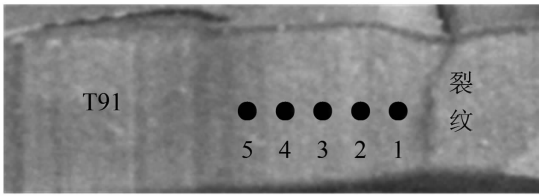
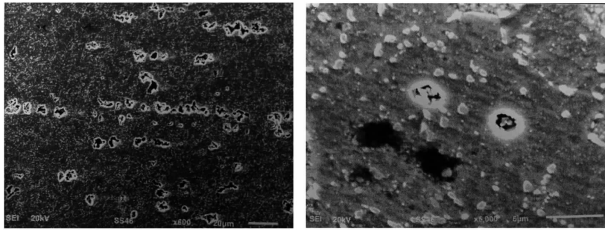


图4 硬度测点分布

1.5 扫描电镜分析

利用扫描电镜对裂纹附近区域进行微观形貌观察,裂纹两侧存在大量的孔洞,且基本沿管子纵向串联成链状分布,见图5(a)。该检测结果与金相组织检测结果一致。通过更高倍数电镜观察,可知孔洞基本都发生在碳化物或夹杂物附近形核长大,见图5(b)。在靠近熔合区的T91母材及对比分析用邻近管段试样同样发现类似的蠕变孔洞,只是蠕变孔洞数量多少及分布情况存在一定程度上的差异。



(a) $\times 500$ (b) $\times 1000$
图5 裂纹附近蠕变孔洞微观形貌

2 开裂原因分析

根据上述检测结果可知,该异种钢接头用T91母材的化学成分合格,排除错用材料的可能。

T91母材力学性能结果表明其延伸率满足标准要求,但抗拉强度和屈服强度低于标准要求值,与同批备品相比,分别降低了13%和26%,因此材质存在劣化的可能。金相组织分析显示,T91母材在长期高温环境运行后,开始析出大量碳化物颗粒,并聚集长大,电镜扫描高倍下可观察到母材存在蠕变孔洞,并沿着夹杂物或碳化物在晶界或晶内形核长大,表明材质存在一定程度的蠕变损伤,与力学性能试验结果一致。

与母材微观组织相对比,裂纹附近区域晶界和晶内弥散析出的碳化物大量增加,且明显聚集长大,蠕变孔洞和蠕变裂纹大量增加。

材料在长期应力和高温作用下发生的缓慢塑性变形的现象称为蠕变,由此造成部件变形或开裂称为蠕变损伤或蠕变断裂。蠕变的出现通常需要3个因素的共同作用:应力、高温和时间。蠕变的应力水平虽然低于材料的屈服强度,部件不会在瞬时破坏,但却会在瞬时产生一定的变形量,而这变形并没有

结束,而是随着时间的推移不断地增加,最终导致材料开裂。温度越高、应力越大,蠕变速度就越快,蠕变变形就越为明显^[4]。

通过查阅该电站高温再热器管屏设计图纸和现场勘查得知,相比煤粉炉,该循环流化床锅炉将高温再热器出口联箱下部管屏异种钢接头管段区域用浇筑材料进行了密封,接头距离上部高温再热器出口联箱管程大约为1.5 m,且仅设计了一处145°弯头作为膨胀伸缩量,致使该接头膨胀受限。由于焊接接头本身存在焊接残余应力,熔合区存在明显的界面突变,在膨胀受限的情况下,应力更加集中,属相对薄弱区域;另外,该部件属于吊挂管,需要承受管屏的自身重力作用,在管接头部位形成的拉应力加重了蠕变损伤的程度,从而导致该接头在熔合线开裂。因为Super304H蠕变强度优于T91,故在同等外界条件下,本异种钢焊接接头在抗高温蠕变性能较差T91侧出现焊蠕变损伤,并逐步扩展为宏观裂纹,而不出现在Super304H侧。

3 结论及建议

1)由于结构设计不当,外置床内的高温再热器管Super304H与T91异种钢接头膨胀受阻;加上该焊缝熔合区存在界面突变,容易引起应力集中,在多种应力共同作用下,高温环境下长期运行后,抗高温蠕变性能较差的T91侧出现蠕变孔洞,在熔合区形成蠕变裂纹,最终发展为宏观裂纹而失效。

2)针对本次开裂失效,建议对该焊接接头至联箱之间的管段全部更换,重新设计该段管路的走向,增加弯头的数量,并将焊缝接头布置在密封盒上方。经整改,运行近一年时间,未出现上述开裂失效现象,充分验证了该方案的可行性。

参考文献

- [1] 李勇. TP347H与T91异种钢焊接性能分析[J]. 广东电力,2007,20(7):19-22.
- [2] 章应霖. 奥氏体耐热钢和火电站异种钢管道的焊接[C]. 超(超)临界锅炉用钢及焊接技术论文集[D]. 2005:57-76.
- [3] 王志红,赵进史,李太彬. T91与12Cr1MoV异种钢的焊接工艺[J]. 焊接,2006(10):54-56.
- [4] 廖景娱. 金属构件失效分析[M]. 北京:化学工业出版社,2003.

作者简介:

蔡志强(1983),硕士、工程师,从事电力行业金属失效分析的研究。

(收稿日期:2015-11-13)

浅析大桥水库水力发电厂 通讯网络现状及未来发展方向

苏 亚

(凉山州大桥水电开发总公司,四川 西昌 615000)

摘 要:介绍了大桥水库水力发电厂计算机监控网络目前的状况及存在的问题,对未来计算机监控网络的建设及远控中心网络建设做初步的规划。

关键词:水利发电厂;监控系统网络;远控中心网络

Abstract:The current situation and existing problems of computer monitoring network in hydroelectric power plant of Daqiao Reservoir are introduced, and the preliminary planning for the network construction of future computer monitoring and remote control center is carried out.

Key words:hydroelectric generation plant; monitoring system network; remote control center network

中图分类号:TM622 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2016)02-0091-04

大桥水库水力发电厂位于四川省凉山州冕宁县境内,是安宁河流域开发的龙头电厂,电厂为引水式电厂。电厂最大水头 189 m,设计水头 156 m,最小水头 130 m。安装 4 台立轴混流式水轮发电机组,单机容量 25 MW 共 100 MW。电厂始建于 1993 年 11 月,于 2000 年 6 月投产。大桥水库水力发电厂水库具有年调节性能,是四川电网枯季主力电厂之一。

1 大桥电厂计算机网络基本情况

1.1 电厂计算机监控系统网络情况

受制于当时的技术与价格等因素,大桥电厂厂内计算机监控系统网络为单星型网络,该结构一般只设置一个独立的网络来连接上位机各节点和现地各控制单元。这种结构的优点是网络设备使用少、结构简单、造价低;但同样也有不少缺点,如过度依赖单一网络,中心节点工作负担过重,单一网络或任一中心节点故障后整个计算机监控系统便趋于瘫痪。

大桥电厂计算机监控系统网络层次分厂站级和现地级:厂站级网络,由 100 Mbps 的工业以太网交换机、2 台上位机操作员站、2 台后台服务器及 2 台通讯机组成,负责全厂设备的监视、控制指令的下达和管理;现地级网络,由开关站 LCU、公用 LCU 和 4 台机组 LCU 组成,负责上位机下达指令的执行,负责机组数据采集及上送,以及和其他设备的管理工

作如励磁系统、调速系统的调节控制和辅助设备监视工作。

1.2 省调通信的情况

大桥电厂目前采用光纤网络和省调通讯,通过租用电信的 2 M 带宽,经冕宁及西昌的电信通讯站进行转接,接入西昌电业局通讯网络,从而进入四川省电力系统专用数据网。

2 大桥电厂网络系统目前存在的问题

2.1 电厂计算机监控系统网络存在的问题

由于大桥电厂使用单星型网络结构,中间节点交接机工作任务重以及设备老化等原因,光纤与交换机之间采用了以太网转换器增加了中间环节,降低了网络可靠性。运行中多次出现上位机操作员站对机组发出指令后,下位机 LCU 不执行或延迟执行的情况。依据国网四川省电力公司规定,国网四川省调度控制中心下发电厂负荷曲线调整指令后,电厂必须在一分钟以内完成负荷调整,电厂运行人员必须在规定时间内完成相关操作。运行人员曾经在上位机下达负荷调整指令后,机组负荷并未按照相应指令进行调整,但计算机监控系统简报窗口提示指令已经下发,多次操作无效后,紧急状况下,运行人员只能快速赶到厂房,在现地对机组 LCU 进行负荷调整操作,抢在规定的时间内完成负荷曲线调整。

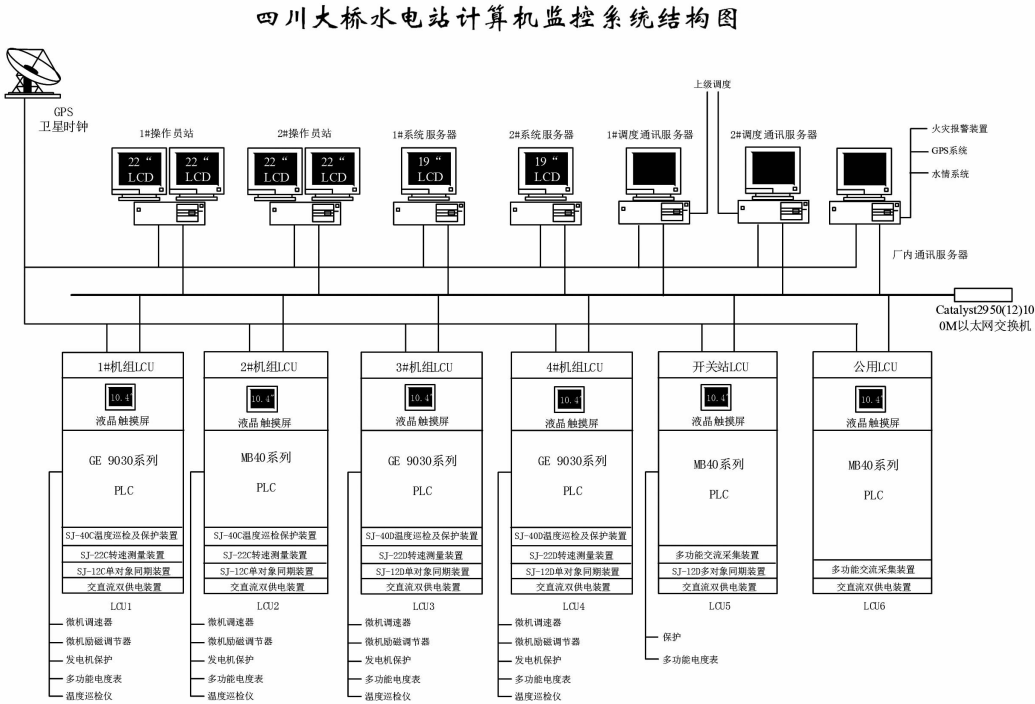


图 1 单星型网络结构图

面对此故障,采用从上位机系统“PING”下位机系统查看网络延迟及数据接收状况发现上下位机网络丢包率高达 13%,造成指令的延迟执行,对机组的安全运行影响非常大,电厂的经济效益也受到很大的影响。

2.2 省调通信存在问题

大桥电厂外部网络通信目前采用租用电信带宽的方式,日常使用中可靠性差。由于冕宁电信通讯机房远离县城,机房电源处于农村电网中,农村电网供电可靠性差,经常发生线路故障造成机房停电,且停电时间长,一般为 1~2 天。停电后机房蓄电池组只能保证 3 h 供电时间,因此大桥电厂对外通讯网络经常会出现 1~2 天的中断时间,电厂的实时数据不能上送,国网四川省调度控制中心的各类调令不能接受,严重影响到电厂的安全运行。按照国网四川省电力公司要求,电厂数据网络中断时间不能超过 4 h,超过 4 h 将按 20 000 kW·h 发电量进行处罚。经统计,近 3 年来由光纤线路故障造成通讯中断的情况就有十几起,且中断时间都不低于 4 h,累计处罚电量超过 200 000 kW·h,对电厂的经济效益造成了巨大损失。

3 大桥电厂网络及远控中心网络建设方案

3.1 大桥电厂站内计算机监控网络改造方案

拟建中的大桥电厂远控中心监控系统通过远控中心通讯服务器与大桥电厂远控中心通讯服务器连接,监视和控制大桥水库水力发电厂的运行设备。为满足远控中心功能要求大桥电厂站内计算机监控系统网络也将做相应的升级建设。计算机监控系统网络建设需结合计算机监控系统配置和设备选型应符合计算机发展迅速的特点,充分利用计算机领域的先进技术,系统达到当前的国际先进水平,建设完成后解决目前计算机监控网络存在的问题,确保电厂的安全稳定运行。

为达到系统升级目的,首先大桥电厂站内监控系统网络结构将由单星型网络改为双星型网络。改造后的监控系统网络满足网络使用的可靠性和安全性,无论监控网络中任何一节点出现故障都不会影响整个网络的运行。同时,将使用传输效率更高,传输质量更可靠的光纤交换机取代以太网转换器,减少故障环节,保障通讯质量。其次,基于现地级网络的机组 LCU 由目前的单 PLC 配置改为双 PLC 配置,即采用双机双网的 CPU 模块构成 CPU 冗余系统。2 个 CPU 模块 1 个为主机运行,1 个为从机运行, CPU 模块之间通过高速内部总线实时备份数据。主 CPU 完成梯形的执行,并且向从 CPU 实时备份数据。当主 CPU 模块出现故障时,从 CPU 能够自动升为主机运行,保证系统运行不受影响。

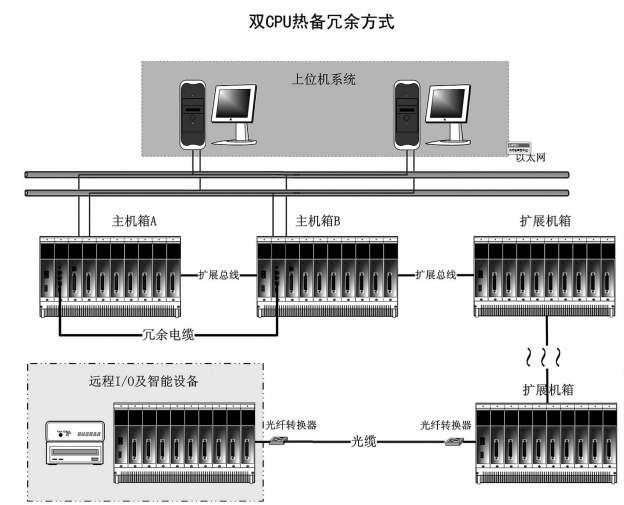


图 2 双 CPU 双星型网络结构图

3.2 远控中心网络系统

3.2.1 网络系统结构

整个远控的监控系统网络架构由以下 3 部分构成：

1) 主干网络：即贯穿四川凉山大桥水电厂远控中心和大桥水电厂监控系统网络的网络，为 1 000 Mbps 的交换式双星型以太网。在该主干网上连接远控中心上位机设备和电厂监控系统的远控中心通信服务器。

2) 站级网络：大桥电厂内部的计算机监控系统网络，由不低于 100 Mbps 的工业以太网构成，连接电厂内服务器兼操作员站和各个现地控制单元 LCU。

3) 现地级网络：电厂现地控制单元设备。

为满足国网四川省电力公司要求，远控中心网络需具备双通道专网配置，两回专网光纤通道组成如下：通道 1，由大桥电厂 220 kV 线路进石棉新棉开关站，租用新棉开关站带宽接入国网四川省电力公司系统专网；通道 2，从位于西昌大桥开发总公司基地内大桥电厂远控中心自建光纤线路至国网凉山供电公司，由国网凉山供电公司接入国网四川省电力公司系统专网。同时目前正在使用的租用电信 2 M 带宽通道将作为备用通道。建设完成后大桥电厂将同时具备 3 条独立线路与国网四川省电力公司进行数据实时传输和业务下达，彻底改变目前频繁断链的通讯状况，对电厂运行的安全性和稳定性有极大的提升。

3.2.2 远控中心设备配置

远控计算机系统由 2 台冗余的历史数据服务器（含磁盘阵列）、2 台主机兼操作员工作站、1 台工程师工作站、1 套 ON - CALL 系统工作站、2 台系统通讯服务器、2 台远控中心通讯服务器、2 台 1 000 M 工业级交换机、2 套 IEC 870 - 5 - 101 规约通信设备、1 套入侵检测系统（含入侵检测探头及管理计算机）、1 套时钟同步系统（主备式，GPS + 北斗卫星）、1 套 UPS（2 × 40 kVA，并联冗余）、2 台 A3 激光打印机等组成。

远控中心控制网络采用 100 M/1 000 Mbps 工业级以太网，通过双星型方式连接远控中心上位机设备。控制区网络采用带有 3 层交换功能的 100 M/1 000 Mbps 工业级骨干交换机，接入贯穿大桥电厂和远控中心的光纤主干网中。

所有需要与外部系统进行交换的数据，均放置在数据交换服务器的数据库中，以避免对实时性和安全性要求程度高的计算机监控系统的非法入侵和干扰。网络应用层协议采用国际上通用的、使用范围较广的开放标准，例如 IEC 61850、IEC 60870 - 5 - 104、Modbus TCP、Ethernet IP、OPC 等。

远控中心计算机系统通过以下方式与电厂通信：

1) 主通道：带宽 155 Mbps 光纤通道，信息传输采用 RJ45 以太网接口；

2) 备用通道：带宽 155 Mbps 光纤通道，信息传输采用 RJ45 以太网接口；

3) 应急通道：带宽 2 Mbps 电信光纤通道，信息传输采用 RJ45 以太网接口。

远控中心计算机监控系统至大桥电厂主备通道的通信接口规约均采用 IEC 60870 - 5 - 104 规约，应急通道的通信接口规约采用 IEC 60870 - 5 - 104 规约。通道切换应按照如下的切换原则实现切换：正常情况下主通道运行，主通道故障时自动切换到备用通道运行；在主/备通道正常运行时，应监听应急通道的状态，当主/备通道均故障时自动切换到应急通道运行；在备用通道运行时如监测到主通道正常，可自动切换到主通道运行；在应急通道运行时如监测到主/备通道正常，可自动切换到主/备通道（主通道优先）。

4 整个监控网络系统特点

1) 开放。监控系统应完全符合国际标准定义

的开放式环境,如采用 Unix、Windows 等操作系统,其中通信网关机应采用 Unix、Linux 操作系统,编程采用 C 语言等高级语言,应用程序的开发界面采用功能图语言。

2)分布。功能和数据库分布在系统各节点上。使本监控系统具有更高的效率、更高的可靠度及更好的可扩展性。

3)高度可靠、冗余。本系统采用冗余全光纤的 1 000 Mbps 交换式快速以太网、冗余系统服务器和冗余电源系统等。

5 结 语

整个监控网络系统的建成将有助于大桥电厂的稳定运行,彻底解决大桥电厂目前运行中存在的电

=====

(上接第 83 页)

在故障发生后,PCC 点母线电压有所降低,随着故障线路的切除,母线电压能够快速恢复至故障前水平,系统保持稳定。由于风机保护动作风电场被切除,此时风电场有功出力与无功出力均为 0。

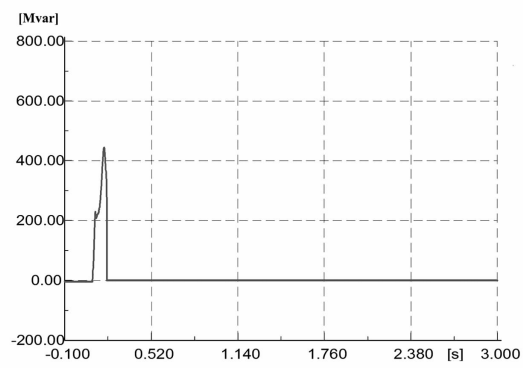


图 12 永磁同步直驱风机接入风电场无功出力变化

3 结 论

基于定子通流及转子通流试验的原理及方法,选取 Dig SILENT 仿真平台,建立了含有风电场的电网仿真计算模型。分别考虑接入双馈风力发电机组和永磁同步风力发电机组,进行了 $N-1$ 故障仿真。从双馈风力发电机组与永磁同步直驱风力发电机机组的仿真分析对比结果可发现,双馈风力发电机组在 A 市内发生故障时保护均未动作,能够较好地为电网暂态稳定提供支撑;而永磁同步直驱风机保护

厂监控系统网络脆弱、对外通讯不稳定等一系列问题。电厂侧更新后的双星型计算机监控系统网络和双 CPU 的 PLC 冗余系统当系统发生故障时,冗余配置的部件及时介入并承担故障部件的工作,从而达到电源的无干扰切换、网络的无干扰配置等积极效果,有效地缩减了系统的故障时间,达到了保证系统正常运行的目的。远控中心计算机监控系统按照上述标准配置建设完成后将能够实时、准确、有效地完成所有被控对象的安全监视和控制任务,并最终实现“无人值班”(少人值守)的运行方式,从而大大提高电厂的经济效益。

作者简介:

苏 亚(1985),从事电厂计算机监控系统维护工作。
(收稿日期:2015-11-11)

动作切机,相比之下,在 A 市的网架结构下,双馈风力发电机组的稳定性要好于永磁同步直驱风力发电机组;因此综合考虑,宜采用双馈风力发电机组接入系统,这对今后的风电场入网暂态稳定研究及其他同类型风电机组的通流试验研究具有一定实际意义。

参考文献

[1] 卢锦玲,石少通,徐超,等. 含大型风电场系统暂态电压稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(1):45-52.

[2] 李升,王家华. 恒速异步发电机型风电场低电压穿越能力仿真研究[J]. 大电机技术,2014(1):24-27.

[3] 吉兴全,刘贵彬,李丹,等. 一种双馈式风机并网的电能质量在线监测方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):145-150.

[4] 王松,李庚银,周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2714-2720.

[5] 刘波,金昊. 永磁直驱风电系统双 PWM 变换器前馈补偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):52-57.

[6] 茅靖峰,吴爱华,吴国庆,等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(18):58-65.

作者简介:

杜旭浩(1986),硕士研究生、工程师,研究方向为电力系统电能质量及微网。
(收稿日期:2015-11-08)