

电场耦合取能技术的仿真与试验研究

倪 源^{1,2}, 谢施君², 贾程乾^{1,2}, 夏亚龙², 张晨萌²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:为给输电线路的监测器件提供稳定、便利的电源,基于电磁感应的原理设计了无线电容取电装置,可以最大化利用空间能量,对支撑输电线路的运行状态监测具有重要意义。首先,分析了电容取电的结构,以此得到取能装置输出功率与高压杂散电容、低压杂散电容、负载电阻等参数的计算关系,发现合理增加感应电极面积、减小感应电极电容值和增加负载电阻值可以有效提升取能装置输出功率;其次,利用多物理场仿真软件模拟了电容取电的影响因素,最后,通过 Matlab 软件设计了高压实验装置,对实际情况进行模拟与实验。实验结果表明,当电源电压为 10 kV、耦合电容为 14 pF 时,1 MΩ 的负载可以得到 0.12 mW 功率。

关键词:电磁感应;运算放大器;无线;电容取电;最大能量

中图分类号:TM 76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0001-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210401

Simulation and Experimental Research on Influencing Factors of Coupling Power Technology

Ni Yuan^{1,2}, Xie Shijun², Jia Chengqian^{1,2}, Xia Yalong², Zhang Chenmeng²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to provide a stable and convenient power supply, based on the principle of electromagnetic induction, a wireless capacitance power take-off device is designed, which can maximize the use of space energy. It is important for the monitoring of the operation status of transmission line. First of all, the structure of capacitance power draw-out is introduced, and the calculation relationship between the output power of energy extraction device and the high-voltage stray capacitance, low-voltage stray capacitance, load resistance and other parameters is deduced. It is found that increasing the area of the sensing electrode, reducing the capacitance value of sensing electrode and increasing the load resistance value reasonably can effectively increase the output power of energy extraction device. Secondly, specify software is used to simulate the influencing factors of capacitance power supply. Finally, a high-voltage experimental device is designed with Matlab software, and the actual situation is simulated and tested. The experimental results show that 1 MΩ load can get 0.12 mW power when the power supply voltage is 10 kV and the coupling capacitance is 14 pF.

Key words:electromagnetic induction; operational amplifier; wireless; capacitor for power; maximum energy

0 引 言

智能电网已经成为电网不可分割的一部分,如今已经有大量的传感器、监测装置应用于电网,获取电网运行的关键数据信息^[1-3]。多数传感器和监测

装置所处工作场景,并不具备常规电源的供电条件。因此,独立于常规电源供电系统的取能技术对于传感器的推广应用就尤为重要。

目前,常规的取能技术主要有太阳能、地线取能、磁场取能等方式^[4-7]。其中,太阳能受环境影响较大,不便应用于日照条件不充足的地区;地线取能技术仅适用于架空输电线路的传感器,且易受到雷

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(宽频暂态电压测量装置溯源及现场校准技术研究 52199918000G)

击的威胁;磁场取能技术目前应用较为广泛,但是一般需要将取能线圈靠近高压导线,且取能大小与导线通流密切相关,无法用于空载的高压导线。由于被监测电力设备一般处于高电压状态下,且特定电压等级的电力设备电压波动较小,因此基于电场的取能技术可提供稳定输出的电源。

近年来,国内外已有学者对电场耦合取能技术开展研究。典型的取能原理是将一个不接地的感应极板布置于电场中,在电场作用下感应极板将感应电荷,采用后级电路可将感应极板的能量供给负荷^[11-12]。由于基于电场耦合的取能装置功率一般较低,提升其功率是研究该取能技术的关键^[13]。有学者提出在后级电路中加入电力电子开关,通过其高频通断提升能量的传递效率;然而开关自身耗能较高且容易发生故障^[14-16]。另一种思路是在后级电路中加入电能变换电路,但其结构复杂、成本较高,且同样需要开关控制,电能消耗比较大^[17]。

为探究电场耦合取能装置输出能力的影响因素为取能电路设计提供参考思路,下面将分析电场耦合取能回路的基本原理,推导后级电路输出电压的理论计算公式,并分析感应极板结构参数、位置、后级电路参数等因素对取能装置输出电压的影响。最后,采用实验室试验对理论分析结果进行验证,从而对后续电场耦合取能技术的优化提供参考。

1 基本原理

采用两个平行布置的金属极板产生均匀电场,电场大小通过金属极板的施加电压幅值和极板距离进行调整。电场耦合取能回路的基本结构如图1所示。其中, A_1 、 A_2 分别为产生均匀电场的高压极板和接地极板; B_1 、 B_2 分别为电场耦合回路的高压感应极板和接地极板; T_c 为不控整流桥,可将电场耦合极板上的交流电压整流为直流电压; R 为负载; U_s 为金属极板上施加的电压; C 为滤波电容; U 为最终施加于负载上的电压。

在图1所示的回路结构中,可采用电路的思想对其进行分析。不控整流桥 T_c 将交流分量变为直流分量,对于直流分量,滤波电容 C 相当于开路,所以计算时可以忽略。其中,负载上的电压 U 可以视为由感应极板电容 C_2 、负载电阻 R 并联形成的二次回路阻抗 Z_L 与感应极板和高压极板之间高压杂散

电容 C_1 分压后得到。

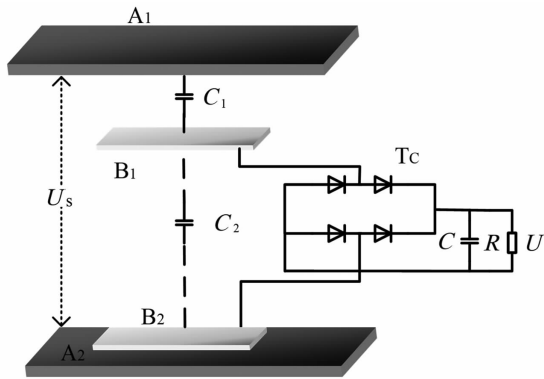


图1 电场耦合取能回路的基本结构

C_2 、 R 并联阻抗为 Z_L ：

$$Z_L = \frac{R}{1 + j\omega C_2 R} \quad (1)$$

根据并联阻抗和高压杂散电容的分压公式可以得到电阻两端的电压 U 为

$$U = \frac{R^2 \omega^2 C_1 (C_1 + C_2) + j\omega R C_1}{1 + R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2} \times U_s \quad (2)$$

故负载上的功率 P 为

$$P = \frac{R^3 \omega^4 C_1^2 (C_1 + C_2)^2 + R \omega^2 C_1^2}{[1 + R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2]^2} \times U_s^2 \quad (3)$$

由式(3)可知,影响负载实际获得的功率与 C_1 、 C_2 、 R 这3个因素有关,下面将通过理论分析具体讨论。

2 影响因素分析

2.1 高压杂散电容的影响

取 $R=1\text{ M}\Omega$ 、 $C_2=10\text{ pF}$, C_1 从0到0.1 nF变化时,负载 R 上的取能功率如图2所示。当电阻 R 、感应极板电容 C_2 不变时,负载取能功率 P 随着高压杂散电容 C_1 的增大而增大,且增长速度逐渐加快。因此,为提升取能功率,应在合理范围内增大高压杂散电容 C_1 。

高压杂散电容 C_1 的大小可由式(4)进行估计,其主要取决于极板结构、填充介质的介电常数以及极板间的相对位置。

$$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d_1} \quad (4)$$

式中: ε 为介电常数; S 为极板的正对面积; d_1 为极板间距。因此,通过改变式(4)中的3个因数,可以获得不同的高压耦合电容值。

为获得准确的高压耦合电容值,在有限元分析

软件中搭建了图 1 所示试验结构的计算模型。

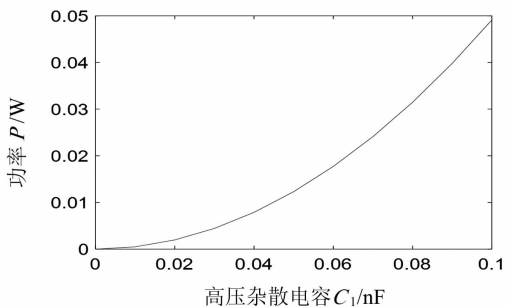
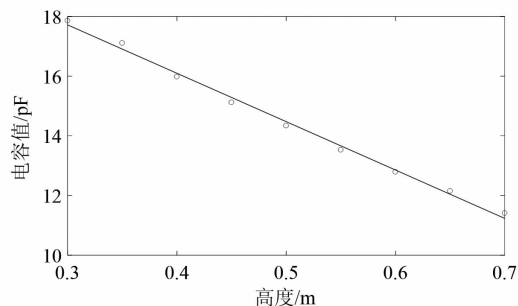
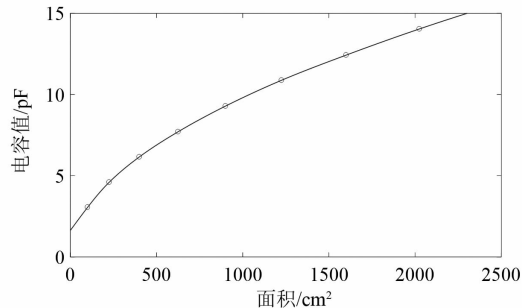


图 2 负载功率随耦合电容的变化

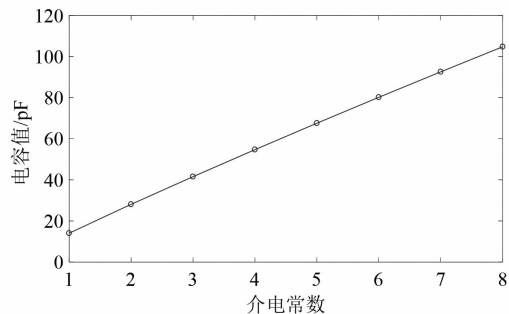
当分别改变感应极板面积 S 、高压极板与感应极板之间的距离 d_1 、介电常数 ε 时,电容值 C_1 的计算结果如图 3 所示。



(a) 电容值随极板间距的变化



(b) 电容值随极板面积变化



(c) 电容值随介质的相对介电常数变化

图 3 极板结构变化的仿真结果

在图 3(a) 中,极板正对面积 $S = 2025 \text{ cm}^2$ 、相对介电常数 $\varepsilon = 1$ 、极板间距 d_1 从 0.3 m 到 0.7 m 变化时,高压杂散电容 C_1 与距离 d_1 成线性变化,距离 d_1 越大,高压杂散电容 C_1 越小,结合图 2 计算结果,负载功率也随之减小。

在图 3(b) 中,相对介电常数 $\varepsilon = 1$ 、距离 $d_1 = 0.3 \text{ m}$ 、面积 S 从 100 cm^2 到 2025 cm^2 变化时,电容值 C_1 随着面积 S 增大而逐渐增大,但增长的幅度逐渐降低。一方面,该现象由平板电极的边缘效应所影响。当平板电极无限大时,电荷均匀分布在电极中;然而实际中的平板面积大小有限,平板边缘电荷相对集中。另一方面,极板边长的增长速度要低于面积。结合图 2 计算结果可知,极板面积增加有利于提高负载功率。然而,受恶劣环境以及极端天气等因素的影响,若面积 S 过大会造成安全隐患,故应在满足使用条件的情况下,选取合适的面积值,提高利用效率。

在图 3(c) 中,面积 $S = 2025 \text{ cm}^2$ 、 $d_1 = 0.3 \text{ m}$ 、相对介电常数 ε 从 1 到 8 改变时,电容值 C_1 随着介电常数 ε 的增大而线性增加。然而,在实际情况中, C_1 的绝缘介质通常为空气,其相对介电常数难以大幅度改变。因此,一般较难通过改变 C_1 的相对介电常数来提升负载的取能功率。

2.2 负载阻值的影响

取 $C_1 = 14 \text{ pF}$ 、 $C_2 = 10 \text{ pF}$,负载阻值 R 从 0Ω 到 $5 \text{ M}\Omega$ 变化时,负载功率变化如图 4 所示。取能功率 P 随着电阻 R 的增大而增大,所以当负载变大时,可以得到更大的取能功率。

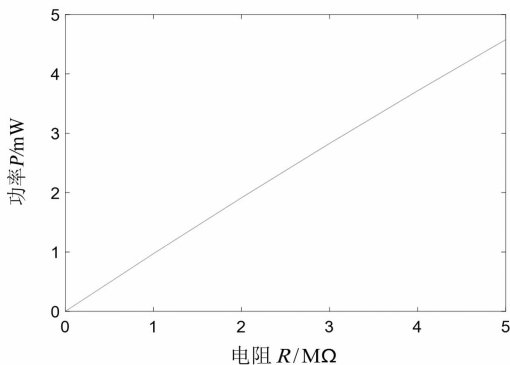


图 4 负载功率随负载阻值变化

2.3 感应极板面积的影响

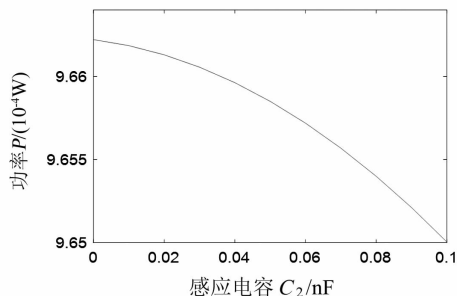


图 5 负载功率随感应极板电容的变化

取 $R=1\text{ M}\Omega$ 、 $C_1=14\text{ pF}$ 、 C_2 从 0 到 0.1 nF 变化时,负载 R 上的功率 P 变化如图 5 所示。取能功率 P 随着感应极板电容 C_2 的增大而减小。故为提升功率,应尽量降低感应极板电容 C_2 的电容值。

3 仿真与实验分析

在 Matlab 中,针对第 2 章中实际运算放大器的取能电路在 Simulink 模块中进行仿真研究。取电源内阻 $r=0.1\text{ }\Omega$ 、电压源 $U=10\text{ kV}$ 、高压杂散电容 $C_1=14\text{ pF}$ 、感应电容 $C_2=10\text{ pF}$ 、滤波电容 $C=10\text{ }\mu\text{F}$ 、负载 $R=1\text{ M}\Omega$,取能装置仿真模型如图 6 所示。

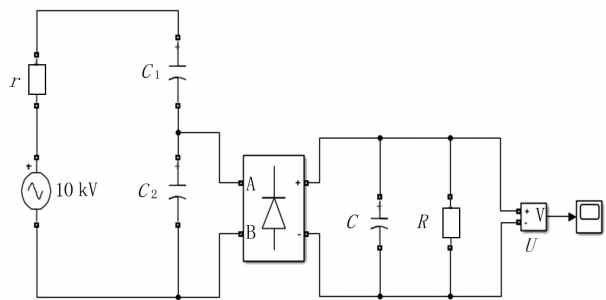


图 6 电场耦合取能回路的仿真模型

此时,取能装置中负载 R 两端的电压波形如图 7 所示。

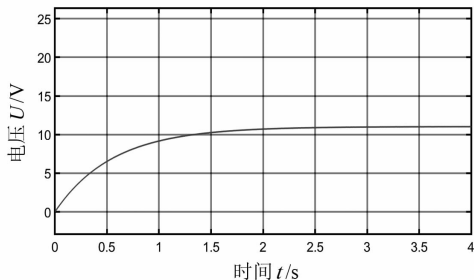


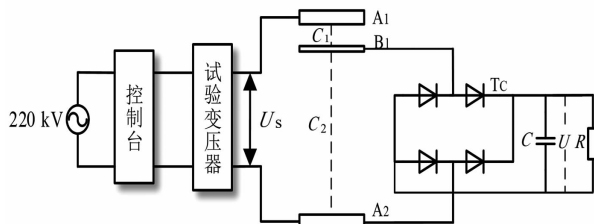
图 7 负载电压仿真波形

如图 7 所示,2 s 后,电阻两端电压稳定在 11 V,在 10 ~ 15 V 之间,所设计的取电装置可以在电场中给阻抗为 $1\text{ M}\Omega$ 的运算放大器提供稳定的电压。

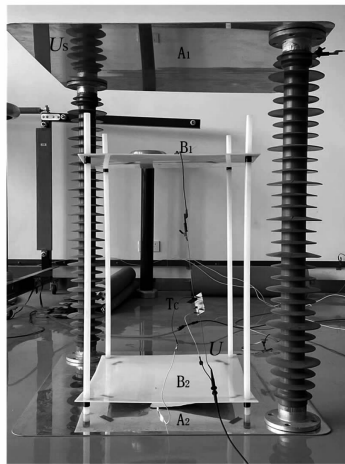
同时,为进一步验证第 2 章分析的取能效率与相关影响因素的变化关系,针对第 2 章分析的试验结构开展试验研究。试验回路示意图及现场布置如图 8 所示,主要由高压试验变压器、电场极板、感应极板和负载组成。电场极板的面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,两块极板的间距高度为 1.24 m ,空间电场值可由施加电压和极板间距初步估计,在所仿真的研究中,该电场值与实际变电站中工频电场值相当。感应极板面

积和高度可以灵活调节。负载 R 两端的感应电压 U 通过示波器探头进行测量。

当调节高压试验变压器输出的工频高压 U_s 时,负载上的电压 U 随工频高压 U_s 线性增加,故在电场强度较大的空间中,相同条件的感应极板可以取得更大功率。



(a) 试验示意图



(b) 现场布置

图 8 取能装置高压试验布置

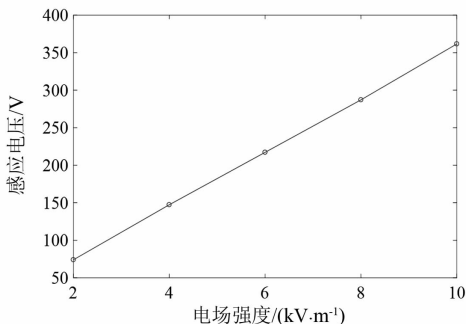


图 9 感应电压随电场强度变化

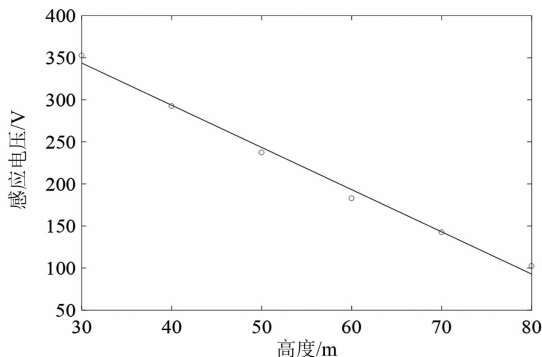
图 10 为调整感应电极与高压电极距离、感应电极面积下的负载电压值。当感应电极与高压电极距离 d_1 从 30 cm 到 75 cm 变化时,负载 R 两端的感应电压 U 与 d_1 成线性降低变化趋势。感应极板 B_1 与高压极板 A_1 的距离 d_1 越小,感应电容 C_2 越小,则负载能够取得的能量越多。

当感应电极面积从 100 cm^2 增加到 2025 cm^2 时,感应电压 U 随着面积 S 的增大而增大,但是增

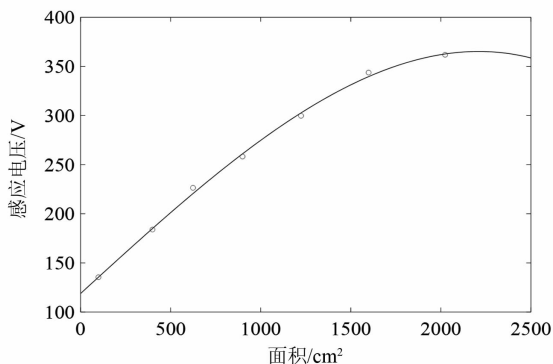
长速度逐渐降低。

在高压极板和感应极板相对结构确定的情况下,通过改变负载 R ,测量其不同的电压值,可求得实际的 C_1 、 C_2 值。

根据实验结果可知,感应电压随着电场强度的增大、极板高度的减小、面积的增大而增大,与第 2.2 节中所得到的取能功率随着金属板上施加的电压的增大、极板高度的减小、面积的增大而增大结果相一致。



(a) 感应电压随感应极板高度变化曲线



(b) 感应电压随极板面积变化曲线

图 10 实验结果

同时在实验中,当电场强度为 10 kV/m 、感应极板 B_1 与高压极板 A_1 的距离 d_1 为 50 cm 、感应极板面积 S 为 2025 cm^2 时, C_1 、 C_2 与前面的仿真高压杂散电容和感应电容取值相同,负载电阻 R 在 $1\text{ M}\Omega$ 到 $10\text{ M}\Omega$ 变化时,功率的变化曲线(见图 11)与理论计算基本相同,由于存在实际损耗,功率略小于计算值。

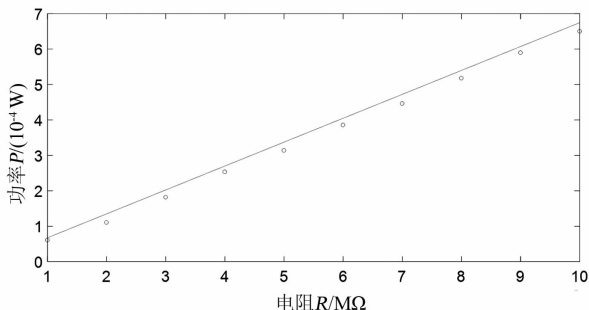


图 11 负载两端功率试验值

4 结 语

上面探究了在匀强电场中的电容取能模型,根据模型建立了取能功率 P 与交流电压 U_s 、高压杂散电容 C_1 、感应电容 C_2 和负载电阻 R 的关系,可知增大取能功率 P 有以下几种方法:1) 增加感应极板面积 S ; 2) 减小感应极板与电场极板的距离 d_1 ; 3) 在电压等级较高的地方取电; 4) 选取负载值较大的电力电子元件。接下来还可以进一步从实际需求出发,将其运用于实际的工程之中,可以进一步改进取能电路以获得更多能量。

参考文献

- [1] 闫嵩琦. 智能电网的信息化系统管理实现[J]. 微型电脑应用, 2020, 36(10): 161 – 164.
- [2] 田伟明. 电容分压式高压取电电源的研究与设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [3] 聚焦下一代智能电网新亮点[J]. 电源世界, 2013(10): 44.
- [4] R Moghe, Y Yang, F Lambert, et al. A Scoping Study of Electric and Magnetic Field Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Power System Applications[C]// 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 3550 – 3557.
- [5] O Cetinkaya, O B Akan. Electric – Field Energy Harvesting in Wireless Networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 34 – 41.
- [6] 董叶叶. 基于电流互感器的电压源设计及控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [7] 毛先胤, 马晓红, 彭赤. 输电线路分段地线感应取能方法研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 219 – 223.
- [8] Vendik I B, Steblevska I, Gerasimov V A, et al. Energy Harvesting for Wireless Sensors From Power Lines Electric Field[C]// 2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID – TA), 2017: 125 – 128.
- [9] S Y Dudnikov, I B Vendik, V A Gerasimov, et al. Energy Harvesting Device for Wireless System of Monitoring Environmental Parameters[C]// 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2017: 330 – 332.
- [10] F Guo, H Hayat, J Wang. Energy Harvesting Devices for High Voltage Transmission Line Monitoring[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1 – 8.

(下转第 10 页)

基于 CFSFDP 算法的边缘电力数据异常检测

张哲敏¹, 李琪林², 严平², 成贵学¹

(1. 上海电力大学计算机科学与技术学院, 上海 200090;

2. 四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045)

摘要:随着智能电网的不断发展, 电力设备产生的数据量逐渐增多, 如何利用电力数据成为电网发展的关键。为了保障电力数据的准确性, 在边缘端快速检测并处理异常数据, 提出了一种基于 CFSFDP 算法的电力数据异常检测的方法。该方法基于 CFSFDP 的假设, 将局部密度较低且距高密度点较远的样本点定义为异常值, 并创新使用了一种根据前后 k 值自动选择异常值的策略, 解决了人工选择时存在主观因素影响的问题。通过与 DBSCAN 和 LOF 的比较表明, 该方法能够快速、高效地找出电力数据中的异常值, 适用于边缘电力数据异常检测。

关键词:异常值检测; CFSFDP 算法; 边缘电力数据; 自动选择策略

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)04-0006-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210402

Detection of Edge Power Data Anomaly Based on CFSFDP Algorithm

Zhang Zhemin¹, Li Qilin², Yan Ping², Cheng Guixue¹

(1. School of Computer Science and Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract: With the continuous development of smart grid, the amount of data generated by power equipment is gradually increasing. How to use power data becomes the key to the development of power grid. In order to ensure the accuracy of power data and detect and process abnormal data quickly at the edge, a detection method for power data anomaly based on CFSFDP algorithm is proposed. Based on the hypothesis of CFSFDP, the sample points with low local density and far away from high density points are defined as outliers, and a new strategy of automatically selecting outliers based on the k values before and after is used to solve the problem of subjective factors in manual selection. The comparison with DBSCAN and LOF shows that the proposed method can quickly and efficiently find the outliers in power data, and is suitable for outlier detection of edge power data.

Key words: outlier detection; CFSFDP algorithm; edge power data; automatic selection strategy

0 引言

如今,随着智能电网的发展,电力系统中产生的数据量也不断增多。但安装在发电、输电、配电、用电各个环节各种类型的计量装置和系统,由于外部干扰等原因,会不可避免地出现异常数据,及时有效地检测出异常数据能够保障电力系统的稳定性和安全性。各种离群点检测算法能够检测出那些与正常数据行为或特征属性差别较大的异常数据或行为,

有利于降低安全风险,减少经济损失。

目前,已经有一些文献研究了电力数据领域的异常值检测算法。它们可以大致分为基于距离的异常值检测、基于密度的异常值检测和基于聚类的异常值检测等。基于距离的异常值检测方法由 EM Knorr、RT NG^[1] 等人在 20 世纪末提出,该方法认为与大多数样本的距离都大于某个固定阈值的点就是异常值点。但这种方法不能判断含有密度不同的多个类簇的数据集。基于密度的异常值检测的原理认为正常样本点所处的类簇密度要高于异常点样本所处的类簇密度。最具有代表性的是基于局部异常因子(local outlier faction, LOF)的异常值检测方法^[2]。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(基于全息感知和边缘计算的新型电能信息交互设备研究项目 52199719001M)

基于聚类的异常检测其目标是将数据点按照一定的规则划分到某一类中,而异常值检测的目标不属于任何簇的样本点 k 均值聚类算法,据此与正常样本点进行区别。目前,主要的基于聚类的异常值检测 k 均值聚类算法采用 k -means 和 DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise) 算法进行聚类^[3-4]。文献[5]针对传统电量数据异常检测方法的不足,提出了一种基于三次指数平滑模型和 DBSCAN 聚类的电量数据异常检测方法。文献[6]采用一种基于孤立森林的异常检测算法,实现大规模电能数据数据的异常检测。文献[7]将 DBSCAN 和 LOF 算法相结合,即 KDBLOF,将 k 近邻 (k -nearest neighbors, KNN) 思想引入到 DBSCAN 中,解决了原 DBSCAN 参数确定困难的问题。

电力数据经采集后会将所有数据上传至集中式数据中心,再使用异常值检测算法做数据清洗,其中异常数据的传输会造成大量的带宽浪费。在边缘端进行异常值检测,可以减少异常数据传输,节省带宽资源。但边缘端一般不具备较高计算能力的计算处理单元,所以需要复杂度低的算法。

基于密度峰值的快速聚类 (clustering by fast search and find of density peaks, CFSFDP) 算法是 Alex Rodriguez^[8]在 2014 年于《Science》上提出的一种快速寻找聚类中心的聚类算法,具有简洁、高效、参数少的特点,十分适合在边缘计算平台中使用。目前,已有不少研究将该算法应用于电力数据异常检测。文献[9]利用 KNN 思想重新定义局部密度和距离,将 CFSFDP 用于电力大数据的异常值检测,但该方法需要人为设置经验参数,不具有普适性。文献[10]采用 LOF 算法和 CFSFDP 算法相结合的聚类算法进行电力数据异常值检测,弥补了 CFSFDP 算法对于局部密度变化大的数据识别能力弱的缺点;但该方法是通过人工选择决策图来实现聚类中心选取,存在主观因素的影响。

下面将 CFSFDP 算法应用于电力数据的异常检测,并提出了一种异常点的选择策略来实现异常点的自动选择。所提方法避免了原算法需要通过决策图人工输入来实现聚类,再从聚类后的数据中寻找异常点的繁琐步骤,降低了算法的冗余性并提高了寻找异常值的效率。

1 CFSFDP 算法

CFSFDP 算法在所提方法中主要基于两个重要的假设思想:一是假设聚类中心相较于其他的样本点局部密度较高,且被局部密度较低的点包围;二是假设各类簇聚类中心之间的距离较远。为了实现这 2 种假设,定义了两种度量方法。

第一个定义是每个点的局部密度,对于每个点 i ,它的局部密度 $\rho(i)$ 的表示有 2 种方法,其中:式(1)为截止距离法;式(2)为核距离方法,适用于数据量较小的数据样本。

$$\rho(i) = \sum_j \chi(d(i,j) - d_c) \quad (1)$$

$$\rho(i) = \sum_{j \neq i} \exp\left(-\left(\frac{d(i,j)}{d_c}\right)^2\right) \quad (2)$$

式中: $d(i,j)$ 为点 i 和点 j 之间的欧氏距离; d_c 为截止距离; $\chi(x) = 1, x < 0$,
 $\chi(x) = 0, x \geq 0$,当 $\chi = 1$ 时意味着点 i 和 j 之间的距离小于截止距离。

第二个定义是每个点距离高密度点的距离。对于每个点 i ,它距离高密度点的距离 $\delta(i)$ 的定义公式为

$$\delta(i) = \begin{cases} \min_{j: \rho_i < \rho_j} d(i,j), & \text{if } \exists j \text{ s.t. } \rho_i < \rho_j \\ \max_j d(i,j), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

根据定义,只有局部密度较大或者全局最大的点, $\delta(i)$ 才能够足够大。

CFSFDP 算法计算局部密度 ρ 和更高密度距离 δ ,将数据集映射成二维图并构造一个决策图(如图 1 所示)。在决策图中, ρ 和 δ 都很大的点(靠右靠上的点)即为聚类中心。在选择聚类中心后,再将剩余点分配给距离最近的聚类中心完成聚类。

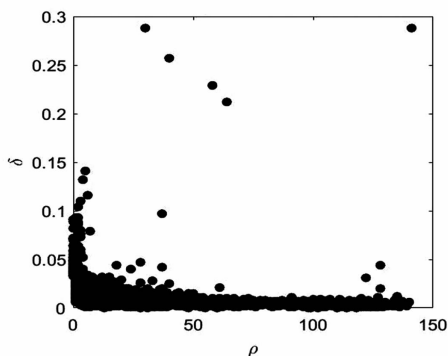


图1 CFSFDP 算法决策

CFSFDP 算法能够在不确定聚类数目时快速地找到聚类中心,但只适用于特定结构的数据集。对于一些稀疏的数据集,如果经验参数设置不当,可能会取得较差的效果。此外,由于选取聚类中心时采用人为框图框选聚类中心的方式,存在主观因素,不同的选取会得到不同的结果,增加了算法冗余性的同时也不利于实现算法的批量自动化应用。

2 基于 CFSFDP 算法的异常值检测

2.1 CFSFDP 检测异常值思路

根据 CFSFDP 算法提出的假设,从异常值检测的角度来看,可以认为局部密度较低且距离高密度点较远的样本点为异常值点。虽然异常值点距离密度较高的点的距离较正常样本点远,但聚类中心之间的距离同样也很远。如果此时该聚类中心的局部密度不够大,很有可能在人工选择异常值时出现将聚类中心误划分为异常值的情况。对此,引入了一个离群值的概念,将样本点的异常度进行量化,方便进行异常值的选择。

对于每个点 i , 它的离群值 λ_i 的定义公式为

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{\delta_i}{\rho_i}, & \rho_i \neq 0 \\ \infty, & \rho_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

当点 i 的局部密度 ρ_i 等于 0 时,此时离群值 λ_i 为无穷大,可以直接定义点 i 为异常值点。其他情况下, λ_i 越高,点 i 成为异常值点的概率越大。

2.2 异常值点自动选择策略

通过离群值的定义,为了找出异常值点,可以将离群值大于一定标准的点定义为异常值点。但该标准通常为人工指定,仍然存在主观因素的影响,所以制定了以下策略来实现异常值点的自动选取。

将所有样本点按照离群值进行降序排列,取出前 $m\%$ 的点得到离群值排列图,如图 2 所示。可以看出,虽然离群值整体呈现下降趋势,但下降的程度有所不同,前面下降得快,后面下降得慢。即前半部分离群值相差大、不稳定,可以认为是异常值点;后半部分因为趋向稳定,离群值下降缓慢,可以认为是正常点。在下降程度发生最大变化的点是离群值总体下降由急变缓的拐点。拐点前的是异常值点,拐点后的是正常样本点。

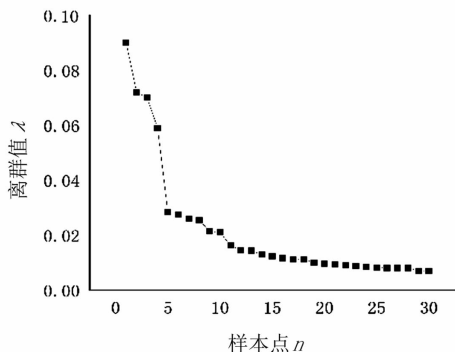


图 2 离群值降序排列

当表示下降趋势时,可以采用斜率进行表示,即

$$k_{i,m} = \frac{\lambda_{i+m} - \lambda_i}{m} \quad (5)$$

式中, $k_{i,m}$ 表示区间 $[i, i+m]$ 内的离群值 λ 变化率,该参数描述了这一区间 λ 的总体变化趋势。

对于某点前后下降趋势,可以用与前一点线段的斜率和后一点线段的斜率的比值来表示。

$$k_i = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \frac{\lambda_{i-1} - \lambda_i}{\lambda_i - \lambda_{i+1}}, & i > 2, \lambda_i \neq \lambda_{i+1} \\ k_{i-1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

第一个点的下降趋势默认为 0,且当该点的离群值与后一点相同时,该点的变化趋势与前一点相同。计算所有点的变化趋势比值,绘制出图 3 所示的变化率趋势图。拐点为使变化率 k 取得最大值时的点。

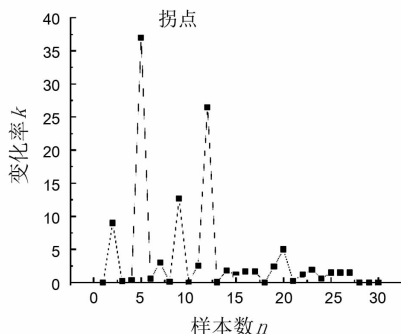


图 3 变化率趋势

得到拐点后,可将拐点前的所有点,视为异常值点,使用 CFSFDP 算法寻找异常值点的具体步骤如下:

- 1) 根据 d_c 确定每一个点的局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 。
- 2) 计算每个点的离群值 λ_i 并从高到低排序。
- 3) 取样本点前 $m\%$ 的点计算变化趋势 k_i 。 m 为经验参数,一般选择 5% ~ 10%。
- 4) 取使 k 取得最大值的拐点 x 。
- 5) 挑选出拐点之前的点 $\{1, 2, \dots, x\}$ 作为异常值点。

3 仿真验证

采用 2017 年 1 月至 10 月某公司的日用电数据作为研究对现象,采样间隔为 15 min。用户日用电数据作为电力数据的一种,经常因为电能表故障和传输异常等原因,造成上传数据存在异常。但在电力数据的异常值检测场景中,异常值所占比例远低于正常对象。因此,只提取了数据集的部分数据,使得最终实验数据中异常值与正常值的比值满足异常值检测的一般要求。并且,为了衡量用电数据异常检测算法的有效性,采用的数据提前进行了人工标注,即异常数据已经被标识,方便检验异常检测算法的效果。

在预处理阶段对数据进行了降维和归一化处理,是为了消除因为量纲不同和数量级差距所带来的影响,且可以加快算法的识别速度。按照式(7)对数据进行归一化处理。

$$x_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{7}$$

为了评估基于 CFSFDP 寻找异常值算法的性能,与 DBSCAN 直接检测异常值、局部异常因子 LOF 算法进行了对比试验。DBSCAN 直接检测异常值是先对数据进行聚类,获得不同的类簇;然后求取各个类簇聚类中心间的距离,如果距离过大则认为是异常用电数据。这里设置 DBSCAN 的参数 ρ 为 0.2。

将算法检测出的异常值与数据样本的真实标签作对比,计算并选取检测率(detection rate)和误检率(false positive rate)作为算法评价标准,检测率和误检率的计算公式如下:

检测率 = $\frac{\text{被检测出的异常数据个数}}{\text{异常数据总数}}$ (8)

误检率 = $\frac{\text{被检测为异常的正常数据个数}}{\text{正常数据总数}}$ (9)

检测率和误检率的实验结果如图 4、图 5 所示。由图可以看出:1)基于 CFSFDP 算法的异常检测在检测异常值时总体检测率较高,误检率较低,明显优于直接利用 DBSCAN 算法检测异常值和利用局部异常因子算法 LOF 检测异常值;2)对于不同月份的检测样本,直接利用 DBSCAN 算法的异常检测算法的检测率和误检率不同且波动较大,这是因为算法对不同数据样本具有独特性,DBSCAN 只适用于部分样本。相对地,基于 CFSFDP 算法的异常检测就

具有较好的适应性,对于不同月份的数据都能维持一个很高的检测率和很低的误检率,变化不大。其中部分月份检测率较其他月份有所降低,原因为该月平均用电量较其他月份有差别,需要提取更多该月样本进行单独检测。

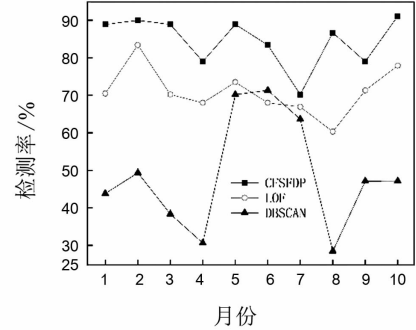


图 4 检测率实验结果

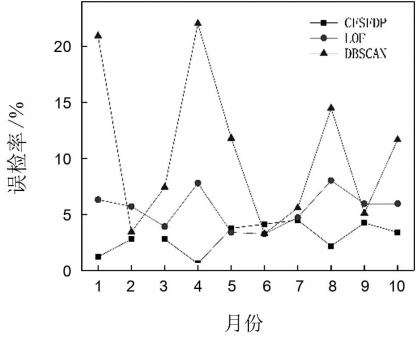


图 5 误检率实验结果

同时,基于 CFSFDP 算法的异常检测还具有快速查找异常值的特点。在实验内存为 8 GB、CPU 为 1.6 Hz 的运行条件下,3 种算法的计算耗时如表 1 所示。

表 1 3 种算法的计算时间

算法	平均运行时间/s
CFSFDP	1.06
LOF	12.31
DBSCAN	30.78

从表 1 可以看出,基于 CFSFDP 算法的异常检测运行时间是比其他两种算法都要短。这不仅证明了基于 CFSFDP 算法的异常检测可以减少计算量,具有快速找到异常值的特点,而且证明了其对大规模数据集具有更好的适应性。

综上,所提出的基于 CFSFDP 算法的异常检测同时具有检测率高、误检率低和运行时间少的特点。在电力生产、调度和决策过程中,可以起到良好的监督防范作用。在用户防窃电方面也能为电力企业提供有力的依据,能够更好地为电力生产和电力缴费服务。

4 结 语

上面对于电力数据的异常检测问题进行了研究,提出了一种基于 CFSFDP 聚类算法的电力数据异常值检测方法。该方法基于原本的密度峰值快速搜索算法提出的两点有关于聚类中心的假设,设立了离群值指标,在该指标的判断下寻找异常值点,实现了异常值点的快速寻找。同时根据离群值下降趋势,提出一种不需要进行人工选择的自动选择异常值点的策略,避免了进行人工选择时主观因素的影响。通过对比该方法与利用 DBSCAN 直接寻找异常值和利用局部异常因子 LOF 寻找异常值的方法,发现该方法能够有效、快速地寻找出异常值点,且该算法复杂度低,耗时短,适合作为边缘设备检测电力数据的算法。

参考文献

[1] Knorr EM, Ng R T, Tucakov V . Distance – based Outliers ; Algorithms and Applications[J]. The VLDB Journal, 2000, 8(3) :237 – 253.

[2] Breunig M M, Kriegel H P, Ng R T, et al. LOF: I- dentifying Density – based Local Outliers[C]// Acm Sig- mod International Conference on Management of Data, ACM, 2000.

[3] 费欢,李光辉. 基于 K – means 聚类的 WSN 异常数据 检测算法[J]. 计算机工程, 2015,41(7) :124 – 128.

[4] 巴建军. 基于 DBSCAN 算法的异常检测方法研究[D]. 天津:中国民航大学,2019.

(上接第 5 页)

[11] S Kang, S Yang, H Kim. Non – intrusive Voltage Meas- urement of Power Lines for Smart Grid System Based on Electric field Energy Harvesting[J]. Electronics Letters, 2017,53(3) :181 – 183.

[12] S Kang, J Kim, S Yang, et al. Electric Field Energy Harvesting under Actual Three – phase 765 kV Power Transmission Lines for Wireless Sensor Node[J]. Elec- tronics Letters,2017,53(16) :1135 – 1136.

[13] 苏超,黄绍川,吴细秀,等. 高压输电线路感应取电试 验研究与分析[J]. 农村电气化,2019(1) :19 – 22.

[14] M Zhu, A Reid, S Finney, et al. Energy Scavenging Technique for Powering Wireless Sensors [C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis,2008:881 – 884.

[5] 肖勇,郑楷洪,余忠忠,等. 基于三次指数平滑模型与 DBSCAN 聚类的电量数据异常检测[J]. 电网技术, 2020,44(3) :1099 – 1104.

[6] 余翔,陈国洪,李霆,等. 基于孤立森林算法的用电数据 异常检测研究[J]. 信息技术,2018,42(12) :96 – 100.

[7] Hongyan Gang ,Bo Liu, Peng Cui, et al. An Outlier Detec- tion Algorithm for Electric Power Data Based on DBSCAN and LOF[C]// In book: Proceedings of the 9th Interna- tional Conference on Computer Engineering and Net- works,2020:1097 – 1106.

[8] Alex Rodriguez, Alessandro Laio. Clustering by Fast Search and Find of Density Peaks [J]. Science, 2014, 344 (6191) :1492 – 1496.

[9] 刘凤魁, 邓春宇, 王晓蓉,等. 基于改进快速密度峰值 聚类算法的电力大数据异常值检测[J]. 电力信息与 通信技术, 2017, 15(6) :36 – 41.

[10] 李航. 基于 LOF 的快速密度峰值聚类的电力数据异 常值检测方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.

作者简介:

张哲敏(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为电力 大数据挖掘;

李琪林(1973),男,教授级高级工程师,从事营销电能 计量和电力信息通信技术服务与研究;工作;

严 平(1966),男,高级工程师,从事营销电能计量和 高压设备技术管理与研究工作;

成贵学(1971),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方 向为过程自动化、电力系统设备控制与检测、电力信息化及 新能源。

(收稿日期:2021 – 01 – 15)

[15] M Zhu, M D Judd, P J Moore, et al. Energy Harvesting Technique for Powering Autonomous Sensors within Substa- tions[C]//2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply,2009:1 – 5.

[16] M Zhu, P C Baker, N M Roscoe, et al. Alternative Pow- er Sources for Autonomous Sensors in High Voltage Plant [C]//2009 IEEE Electrical Insulation Conference, 2009:36 – 40.

[17] 王黎明,李宗,孟晓波,等. 一种交流电场无线取能电 源的优化设计[J]. 高压电器,2020,56(5) :121 – 127.

作者简介:

倪 源(1997),女,硕士研究生,研究方向为电力电子 与电力传动。

(收稿日期:2021 – 04 – 05)

基于二端口散射参数的 CVT 宽频暂态模型

潘 飞¹, 穆 舟², 刘 浩³, 王彤彤⁴, 江 波⁵, 张 榆², 张晨萌², 谢施君², 林国松¹

- (1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;
- 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
- 3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;
- 4. 山东泰开互感器有限公司, 山东 泰安 271000;
- 5. 国网四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045)

摘 要:电容式电压互感器 (CVT) 因为绝缘强度高、测量工频电压准确的优点, 在电力系统中的运用十分广泛。由于雷电过电压、操作过电压等暂态信号时常在电力系统内发生, 但 CVT 只能准确传递工频信号, 而传递非工频信号将产生不同程度的失真。因此, 首先利用黑盒模型基于 CVT 的端口参数进行宽频建模, 再通过网络分析仪测量其散射参数并利用矢量匹配法和福斯特等值电路理论转化为 π 型等值电路; 最后通过雷电冲击实验得到的 CVT 高压输入波形, 利用贝杰龙法和支路电流矩阵法计算, 成功得到与测量结果近似相同的二次侧输出波形, 验证了模型的正确性。

关键词:电容式电压互感器 (CVT); 散射参数; π 型模型; 宽频暂态

中图分类号: TM 451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)04-0011-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210403

Broadband Transient Model of CVT Based on Two-port Scattering Parameters

Pan Fei¹, Mu Zhou², Liu Hao³, Wang Tongtong⁴, Jiang Bo⁵, Zhang Yu²,
Zhang Chenmeng², Xie Shijun², Lin Guosong¹

- (1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;
- 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- 4. Shandong Taikai Instrument Transformer Co., Ltd., Taian 271000, Shandong, China;
- 5. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract: Due to the advantages of high insulation strength and accurate power frequency measurement of capacitor voltage transformer (CVT), it is widely used in power system. As lightning overvoltage, switching overvoltage and other transient signals often occur in power system, CVT can only accurately transmit power frequency signals, and non-power frequency signals will produce varying degrees of distortion, so it is necessary to model CVT in broadband transient. A black box model based on port parameters of CVT is used to build the model, then through network analyzer, the scattering parameters of the CVT is measured, and vector fitting method and Forster equivalent circuit theory are used to transform the model to π type of equivalent circuit. Finally, the high-voltage lightning input waveform of CVT is obtained by lightning impulse test, and the output waveform of secondary side is obtained by using Bergeron model and computing branch current equation, which is similar to the measurement results, so the correctness of the proposed model is verified.

Key words: capacitive voltage transformer (CVT); scattering parameters; π -type model; broadband transient model

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目 (4Z19W197A01F);
中国博士后基金 (2019M663485)

0 引 言

电压互感器是电力系统中必不可少的测量设备,其将一次系统和二次系统电气隔离开,以便在二次侧对系统进行测量和保护等工作。目前,国内外电力系统大量投入使用的电压互感器主要包含电磁式电压互感器和电容式电压互感器两种。其中电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)由于其绝缘强度高、不易发生铁磁谐振且价格较低等优点被广泛运用于 110 kV 以上的电网中^[1]。

在研究过电压保护问题时,暂态过电压包含丰富的非工频频率分量,而之前广泛运用的 CVT 在线监测系统不能满足非工频暂态电压的 CVT 的宽频测量。因此 CVT 宽频模型的建立一直是众多学者专家研究的重点。准确的 CVT 宽频模型的建立对于雷电过电压、操作过电压的测量和电磁兼容问题有着重要的意义。

1 CVT 的宽频模型

如图 1 所示,CVT 主要由电容单元和电磁单元两部分组成。其中电容单元主要由高压电容 C_1 和中压电容 C_2 串联组成。电容单元将高电压电压波形转换为 10 ~ 20 kV 中压电压波形输入电磁单元。电磁单元由中间变压器、补偿电抗器 L、阻尼器 D、避雷器 BL 等组成。为了减小负荷对中压电压的影响,电磁单元的中压侧接入一个补偿电抗器,其在工频电压下与电容单元的中压点阻抗谐振。

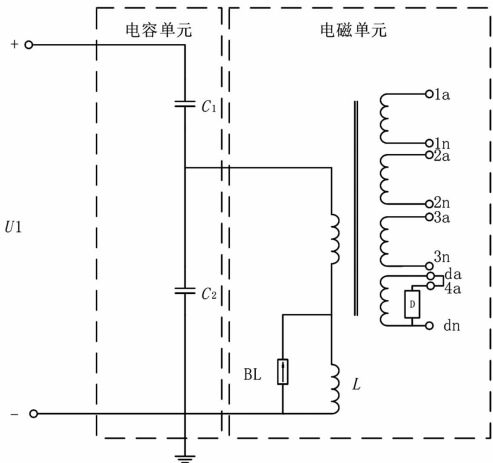


图 1 CVT 稳态物理模型

图 1 所示的模型为 CVT 的稳态物理模型。该

模型能够准确地体现工频电压下 CVT 的工作情况。而具有高频成分的暂态电压还将受制于 CVT 内部复杂的杂散参数以及元件之间的耦合等效应。由于传统的 CVT 稳态物理模型无法囊括这些效应,因此需要构建新的 CVT 宽频暂态模型来反应 CVT 的暂态电压传递特性。

采用图 2 所示的 π 型黑盒模型来构建 CVT 宽频暂态模型。

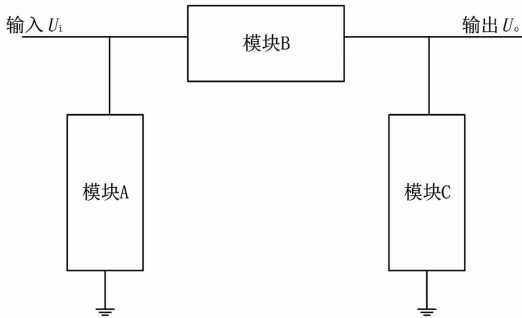


图 2 CVT 黑盒模型

CVT 黑盒模型由 3 个子模块构成,子模块内部均由传统的 R 、 L 、 C 元件构成。整个模型基于准确测量得到的端口宽频参数来构建,而不必得到物理模型中各个元件的准确参数。

CVT 的 π 型黑盒建模的步骤如下:

- 1) 测量待测件端口之间的宽频二端口散射参数(S 参数),并转化为二端口导纳参数(Y 参数)。运用矢量匹配法将 Y 参数拟合成有理数表达式,并进行端口无源优化。
- 2) 基于二端口 Y 参数,计算各个子模块的单端口导纳参数的有理数表达式。
- 3) 基于各个子模块的导纳参数的有理数表达式,进一步用电路综合理论建立等值电路模型。

2 CVT 二端口宽频参数的测量与计算

2.1 宽频参数的获取

首先运用网络分析仪测量 CVT 输入、输出端口的二端口 S 参数。如图 3 所示,二端口 S 参数的 4 个子参数分别代表着在功率归一化后,两个端口各

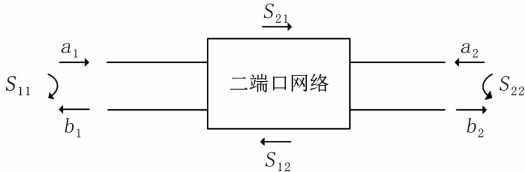


图 3 S 参数

自的反射参数与两个端口之间的传输参数,可分别用式(1)计算。

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{b_1}{a_1} & S_{21} &= \frac{b_2}{a_1} \\ S_{12} &= \frac{b_1}{a_2} & S_{22} &= \frac{b_2}{a_2} \end{aligned} \quad (1)$$



图4 AGILENT E5071C 对 CVT 的测量

如图4所示,采用 AGILENT E5071C 矢量网络分析仪对一台型号为 TYD110/ $\sqrt{3}$ -0.01H 的 110 kV CVT 在 9 kHz ~ 2 MHz 频率范围内进行二端口 S 参数的测量,其结果如图5所示。

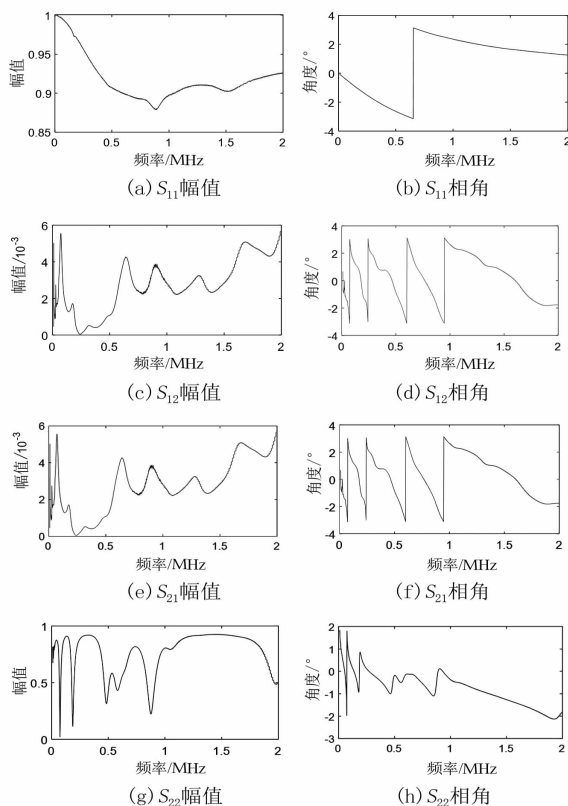


图5 S 参数测量结果

获取 S 参数后,运用式(2)^[2]将 S 参数转换为 CVT 的 Y 参数。其中 Z_{01} 、 Z_{02} 为端口匹配阻抗,由于实验中使用的同轴电缆以及各端口的特征阻抗均为 50 Ω ,因此端口匹配阻抗也取 50 Ω 。

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{(1 - S_{11})(Z_{02} + S_{22}Z_{02}) + S_{12}S_{21}Z_{02}}{(Z_{01} + S_{11}Z_{01})(Z_{02} + S_{22}Z_{02}) - S_{12}S_{21}Z_{01}Z_{02}} \\ Y_{12} &= \frac{-2S_{12}\sqrt{R_{01}R_{02}}}{(Z_{01} + S_{11}Z_{01})(Z_{02} + S_{22}Z_{02}) - S_{12}S_{21}Z_{01}Z_{02}} \\ Y_{21} &= \frac{-2S_{21}\sqrt{R_{01}R_{02}}}{(Z_{01} + S_{11}Z_{01})(Z_{02} + S_{22}Z_{02}) - S_{12}S_{21}Z_{01}Z_{02}} \\ Y_{22} &= \frac{(1 - S_{22})(Z_{01} + S_{11}Z_{01}) + S_{12}S_{21}Z_{01}}{(Z_{01} + S_{11}Z_{01})(Z_{02} + S_{22}Z_{02}) - S_{12}S_{21}Z_{01}Z_{02}} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 Y 参数的矢量匹配拟合和无源优化

对于上一步获取的一定频率范围内 CVT 二端口 Y 参数,其必须拟合为有理数表达式才能进一步地处理。这里采用矢量匹配法对 Y 参数进行有理数表达式拟合。

矢量匹配法^[6-8]是一种能快速收敛且能保持函数稳定性的有理函数拟合方法,由 B. Gustavsen 于 1999 年提出。矢量匹配法简洁、快速、稳定且无数值病态问题,被广泛运用于宏模型提取方法和频域线性系统拟合等方向。矢量匹配法将上面测量得到 Y_{11} 、 Y_{12} 、 Y_{21} 、 Y_{22} 进行有理数拟合,分别表达为如式(3)的有理数分式和形式:

$$f(s) \approx \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - a_i} + d + se \quad (3)$$

式中:留数 c_i 和极点 a_i 为实数或共轭复数对;而常数项 d 和比例项 e 为实数且为可选项,这里忽略,即 $e = 0, d = 0$; N 为总支路数。

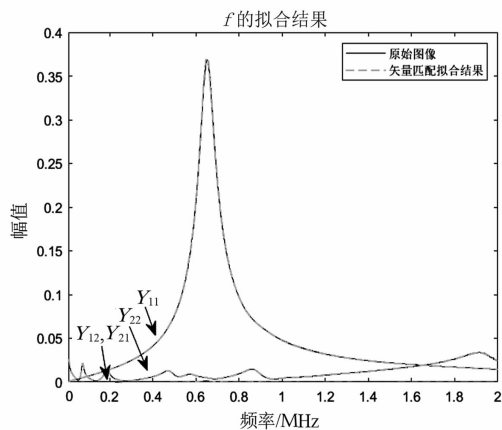


图6 幅值匹配结果

这样矢量匹配的问题就转化为如何得到式(3)中各项系数的估计值来求得 $f(s)$ 的最小二乘估计。由于

未知极点 a_i 在分母,则式(3)对未知数来说是非线性求解问题。矢量匹配法通过引入初始极点将非线性求解问题分解为两步连续的线性问题来求解。

对测得的 S 参数进行矢量匹配的结果如图 6 和图 7 所示,匹配的误差在 10^{-4} 以下,表明匹配的结果较为精准。

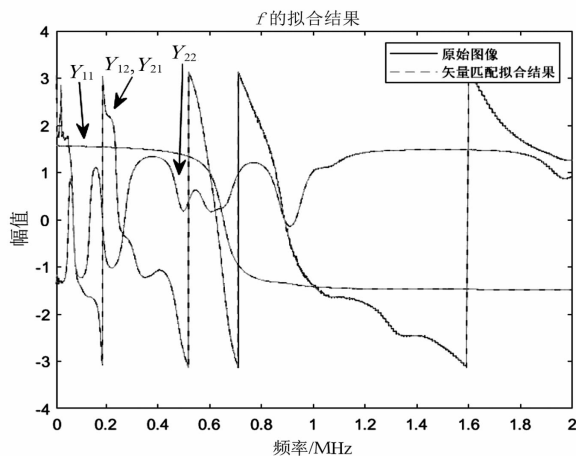


图 7 相角匹配结果

矢量匹配法能够保证拟合结果的稳定性(极点实部小于 0),但是无法保证其结果的无源性。而有源的模型也会导致模型的计算结果出现不稳定情况,因此有必要对拟合出的 Y 参数进行无源优化。

无源性是指一个二端口网络无论在什么端口条件下均不对外产出能量。假设导纳参数矩阵为 $Y(s)$, 则电流电压有如式(4)的关系。

$$I = Y(s) \dot{U} \quad (4)$$

式中: $\dot{U}$ 为任意复数电压向量; I 为对应复数电流向量。

将矩阵 $Y(s)$ 分解为电导 $G(s)$ 与导纳 $B(s)$ 之和的形式,则端口网络吸收的有功功率为

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{Re} \{ \dot{U}^* Y(s) \dot{U} \} = \\ &\operatorname{Re} \{ \dot{U}^* (G(s) + jB(s)) \dot{U} \} = \\ &\operatorname{Re} \{ \dot{U}^* G(s) \dot{U} \} \end{aligned} \quad (5)$$

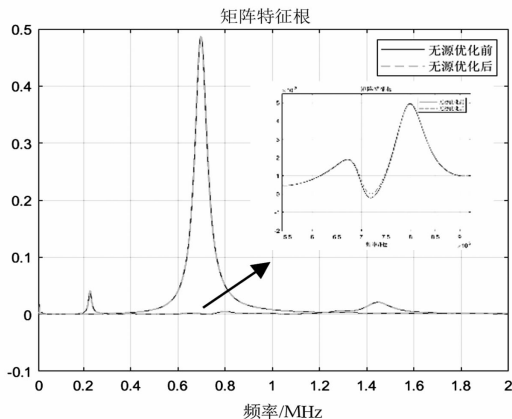


图 8 对导纳参数的无源优化

由端口无源的定义可知,网络吸收的有功功率必须为正值,即式(5)中 $P = \operatorname{Re} \{ \dot{U}^* G(s) \dot{U} \} > 0$ 。因此要保证网络的无源性就是保证网络电导矩阵 $G(s)$ 的所有特征值均大于 0。确定该条件后,利用二次规划法对 Y 矩阵进行优化^[10]。

该 CVT 优化前后的导纳参数特征根如图 8 所示,可见部分小于 0 的特征值被优化为正值,从而保证了端口的无源。

2.3 模型的电路实现

基于上一节获得的无源优化后的二端口 Y 参数的有理表达式,可用式(6)计算如图 2 所示的 π 型电路中每个子模块的单端口 Y 参数有理表达式。

$$\begin{aligned} Y_A &= Y_{11} + Y_{12} \\ Y_B &= -\frac{Y_{12} + Y_{21}}{2} \\ Y_C &= Y_{12} + Y_{22} \end{aligned} \quad (6)$$

在获取 3 个子模块的单端口 Y 参数有理表达式后,根据福斯特 II 型电路综合理论进行等效电路构建。具体地,每个子模块的表达式可以化为式(7)所示的福斯特部分分式和表达式^[10]。

$$\begin{aligned} f(s) &= h + \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_{ci}}{s - p_{ci}} + \frac{r_{ci}^*}{s - p_{ci}^*} \right) + \\ &\sum_{i=1}^m \left(\frac{r_{ri}}{s - p_{ri}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: h 为常数项; n 为复极点数; m 为实数极点数; p_{ri} 和 r_{ri} 分别为第 i 个实数极点和留数; p_{ci} 、 p_{ci}^* 、 r_{ci} 和 r_{ci}^* 分别为第 i 对复共轭极点和留数。

对于其中的常数项,可综合表达为如图 9 所示阻值为 $\frac{1}{h}$ 的电阻 R_0 。

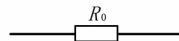


图 9 常数项等效电路

对于实数极点项,可综合表示为如图 10 所示的 RL 支路,其值如式(8)所示。

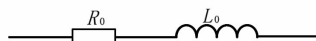


图 10 实数极点项等效电路

$$\begin{aligned} R_0 &= -\frac{p_{ri}}{r_{ri}} \\ L_0 &= \frac{1}{r_{ri}} \end{aligned} \quad (8)$$

对于复共轭极点项,可综合表示为如图 11 所示

的 RLCG 串并联支路。

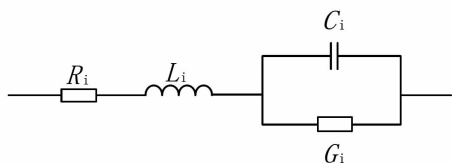


图 11 复共轭极点项等效电路

图中各元件的值如式(9)所示。

$$\begin{aligned} L_i &= \frac{1}{r_{ci} + r_{ci}^*} \\ R_i &= [-(p_{ci} + p_{ci}^*) + (r_{ci}p_{ci}^* + r_{ci}^*p_{ci})L_i]L_i \\ C_i &= \frac{1}{L_i[p_{ci}p_{ci}^* + R_i(r_{ci}p_{ci}^* + r_{ci}^*p_{ci})]} \\ G_i &= -(r_{ci}p_{ci}^* + r_{ci}^*p_{ci})C_iL_i \end{aligned} \quad (9)$$

将上述各个电路并联即可形成子模块的等效电路。则整个 π 型电路如图 12 所示,模型即建立完成。

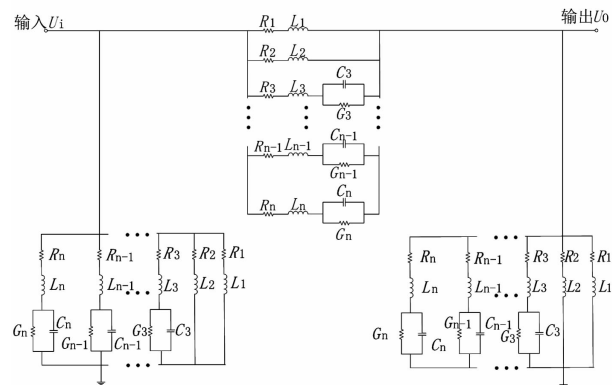


图 12 电路综合后的黑盒模型

2.4 模型的计算与验证

为了证实模型的正确性,在测得 CVT 输入雷电冲击波形 U_{in} 的情况下通过电路综合后的黑盒模型计算得到 CVT 二次侧输出 U_{out} 并与实测值对比。

针对图 12 中的储能元件,采用贝杰龙法对其进行处理^[11]。电感和电容可分别将其等值电路表示为如图 13 所示的形式,图中的 $I_L(t - \Delta t)$ 和 $I_C(t - \Delta t)$ 是电感和电容的历史电流值。

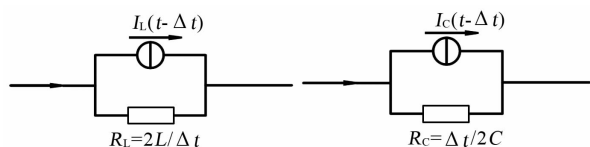


图 13 电感、电容等值电路

在已知 U_{in} 的情况下,在每个时间点利用支路电流法计算 U_{out} 。设模块 B 和模块 C 中各个支路的支路电流、电感电流、电容电流和电导电流为未知数 I_L 、 I_C 、 I_G 和 I' 、 I'_L 、 I'_C 、 I'_G 。对电路节点列写基尔

霍夫电流定律方程并对独立的单孔回路基于基尔霍夫定理列写电路矩阵,即可求解相关参数。

在 S 参数的测量完成后,不改变 CVT 的任何配置,对其进行雷电冲击实验。雷电冲击实验采用实验用雷电冲击发生器对 CVT 输入 200 kV 的标准雷电冲击波。

首先,将 CVT 的所有 n 端良好接地,所有二次侧端口均开路。将标准雷电冲击发生器的输出端与 CVT 高压输入端口相连,CVT 二次侧端口 1a—1n 通过 1000:1 的衰减器后接入示波器。雷电高压波形通过与 CVT 并联的 129 700:1 的标准阻尼式电容分压器输入示波器。CVT 输入的高压雷电波形如图 14 所示,实际峰值约为 209 kV。

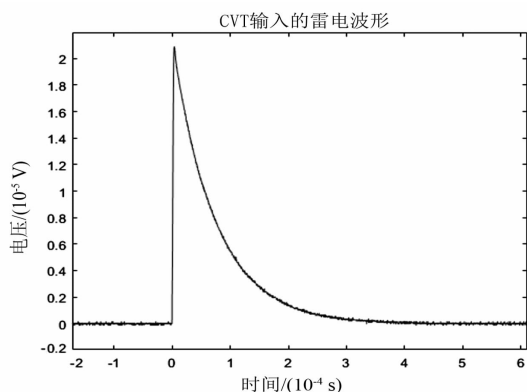


图 14 高压标准雷电波形

将测得的高压标准雷电波形带入所述的支路电流法电路矩阵中,计算得到各时刻 CVT 二端口输出情况,与测量的二次侧波形进行对比,如图 15 所示。

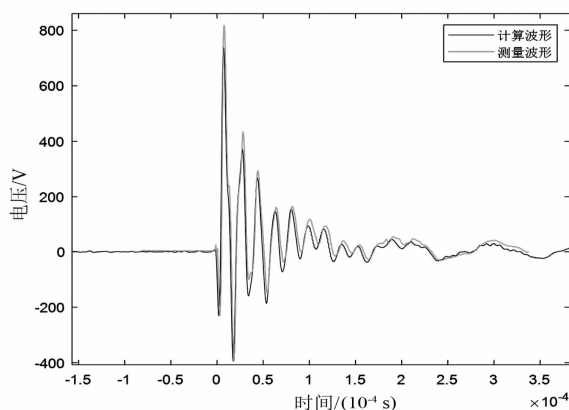


图 15 计算和测量对比结果

由图 15 可看出,计算得到的波形和实验测得的 CVT 输出波形基本一致。

3 结 语

上面利用二端口散射参数、黑盒模型构建了 π

(下转第 32 页)

基于局部密度的最小生成树聚类算法及其在电力大数据的应用

靳文星¹, 王电钢², 张哲敏¹

(1. 上海电力大学计算机科学与技术学院, 上海 200090;
2. 国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041)

摘 要:电力大数据主要来源于电力生产和电能使用的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节,,如何运用这些数据提高电力管理工作的智能化水平已经成为相关电力环节十分重要的研究课题之一。但现有电力大数据中用到的聚类方法却不能发现任意形状的数据集聚类类别(即类簇),这影响了电力大数据在应用中的计算精度与计算时长。因此提出了一种新的算法,即使用局部密度峰值和基于共享邻点的距离,更好地结合了密度与距离的关系,表示出数据之间的差异。使用局部密度峰值并用基于共享邻点的距离来构造最小生成树,然后重复切割最长的边,直到找到给定数量的簇。在电力大数据应用上的实验结果表明,该算法在具有良好的效果。

关键词:最小生成树;聚类;局部密度峰值;基于共享邻点的距离

中图分类号:TM 769 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0016-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210404

Minimum Spanning Tree Clustering Based on Local Density and Its Application to Power Big Data

Jin Wenxing¹, Wang Diangang², Zhang Zhemin¹

(1. School of Computer Science and Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Power big data mainly comes from all aspects of power generation, transmission, transformation, distribution, power consumption and dispatching of power production and energy use. How to use these data to improve the intelligent level of power management has become one of the most important research topics of the related power links. However, the existing clustering methods used in power big data can not find clusters of arbitrary shape, which affects the calculation accuracy and calculation time in the application to power big data. A new algorithm is proposed, which uses the local density peak and the distance based on shared neighbor points to better combine the relationship between density and distance and express the differences between data. The minimum spanning tree (MST) is constructed by using the local density peak and the distance based on the shared neighbor, and then the longest edge is cut repeatedly until a given fnumber of clusters is ound. The experimental results show that the proposed algorithm has a good effect in the application to power big data.

Key words:minimum spanning tree; clustering; local density peaks; shared neighbor-based distance

0 引 言

近些年,针对电力大数据收集和存储中数据量大、数据收集不精准的问题,先后提出并采用了 K-means、K-medoids^[1]和一些改进之后的 K-means

算法,但是这些算法的使用都必须初始化聚类中心。为了避免初始化聚类中心,在算法领域中的 AP 算法^[2]将所有数据点都视为潜在的中心。K-AP^[3]是 AP 算法的改进,它在消息传递过程中引入约束,利用 K 簇产生的直接结果,然而,由于每个点总是分配到最近的中心,导致这些算法不能发现任意形状的聚类(即类簇)。还有一种快速搜索发现密度峰值^[4](density peak, DP)的聚类算法,选择局部密度

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(输变电设备物联网边缘智能关键技术研究及应用 52199920002W)

最大的点作为聚类中心,将其余点作为密度最大的近邻分配到同一个类别中。假设每个类簇都有收缩的密度核,大致保留了类簇的形状,并提出了一种基于密度核的聚类算法,称为 Dcore^[5]。基于密度的聚类算法 DBSCAN^[6]将聚类定义为由稀疏区域分隔的稠密区域。它的关键思想是,设定集群的每个核心点,在每个核心点周围给定半径内必须包含有参数设定数量的点(如参数设定为 30,则若一点给定半径范围内有超过 30 点,即认定此点为核心点)。Dcore 和 DBSCAN 可以有效地识别具有任意形状的数据集,但是它们必须设置许多参数。

针对电力大数据中无法高效识别具有任意形状数据集的问题,提出了基于最小生成树(minimum spanning tree, MST)和局部密度峰值(local density peak, LDP)的聚类算法,称为 LDP - MST,它在发现复杂数据时,不仅计算效率高,而且可以与其他先进的聚类方法相媲美。在 LDP - MST 中,首先找到局部密度峰值,将剩余的点分配到相应的局部密度峰值;然后,定义一个新的基于共享邻点的局部密度峰值之间的距离,并利用新的距离在局部密度峰值上构造最小生成树;最后通过不断地去除最长边,得到了最终的聚类。

1 基于局部密度峰值和共享邻点的 MST 聚类

现有的基于 MST 的聚类算法,在整个数据集上构造 MST 的时候,因为只利用树中包含的边缘信息对数据集进行划分,导致数据的计算量很大,而且容易受到噪声点的影响。基于此问题,提出了一种基于局部密度峰值的最小生成树聚类算法(以图 1 所示的一个数据集为例)。首先,选取相邻区域中局部密度最大的点作为局部密度峰值,并将其余点分配到相应的局部密度峰值附近,如图 1(a)所示;然后,定义一个新的局部密度峰值之间的距离分类(它考虑了欧几里得距离和邻点信息),利用局部密度峰值和距离构建 MST,如图 1(b)所示。在此之后,根据新的距离不断地去除最长的边,并进行距离连线,直到得到期望的簇数。图 1(c)中链接不同簇之间的边是需要从 MST 中更正的边,最后得到如图 1(d)所示的聚类结果。整个算法过程由于只在局部

密度峰值上构造 MST,减少了噪声点的干扰,大大提高了算法的效率。

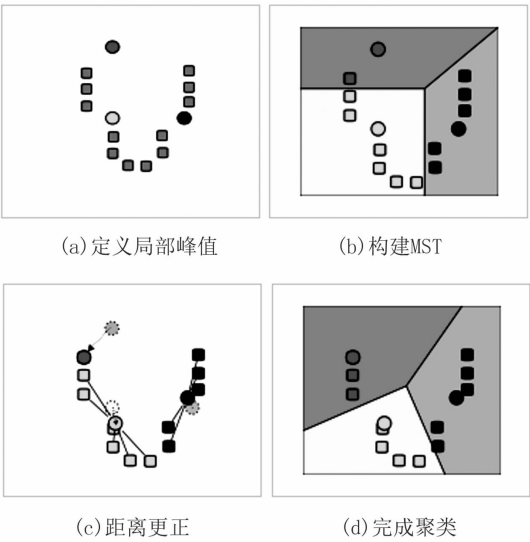


图 1 LDP - MST 的主要思想

1.1 局部密度

为了找到局部密度峰值,首先定义点的局部密度。因为稠密区域的点与其近邻点的距离总和通常小于稀疏区域的点与近邻点的距离之和,在稠密区域,nb 值较大;在稀疏区域,nb 值较小,所以,点 p 的局部密度与 $nb(p)$ 的值成正比,与点 p 和其相邻点之间的距离成反比。利用这一特性,计算局部密度 $\rho(p)$:

$$\rho(p) = \frac{nb(p)}{\sum_{q \in NNK(p)} d(p, q)} \tag{1}$$

式中:nb(p)为到达自然特征值时的 p 的反向近邻数;NNK(p)为 p 的反向 k 近邻; $d(p, q)$ 为 p 和 q 之间的距离。

如图 2 中给出了每个局部密度峰值的邻域(图中粗线表示),其中包括其成员和一些额外的最近邻域,在图中用不同点间的连线表示。共享邻点的数量和密度越大,表示它们之间的距离越小。

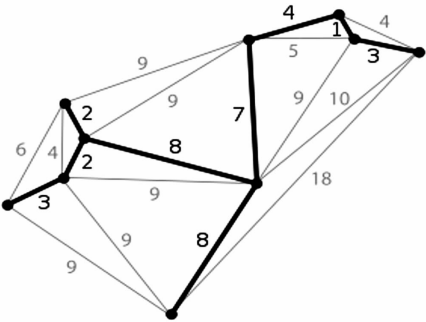


图 2 LDP 的邻点和共享邻点

1.2 基于共享邻点的局部密度峰值之间的距离

由于欧几里得距离不能很好地对复杂数据进行恰当度量,且由于大多时候都测量不到图形点位置的先验信息,导致不能直接得到准确的测量距离。基于局部密度峰值的共享邻域,采用了一个新的距离,即基于共享邻点的局部密度峰值之间的距离。

由于数据集中局部密度峰值分布不均匀,欧氏距离不适用于测量局部密度峰值之间的差异。所以使用基于邻域的共享距离利用局部密度峰值之间的邻域信息,缩短被稠密区域紧密相连的局部密度峰值之间的距离的方法更恰当地表示了局部密度峰值之间的差异。

以图 3 所示的数据集为例,图 3(a)为局部密度峰值及其邻域点,图 3(b)为用欧几里得法构造的局部密度峰值的 MST 图像,图 3(c)为基于共享邻点的距离构造的 MST 图像。局部密度峰值 p 和 q 在同一簇, q 和 o 在不同簇,但是 p 和 q 之间的欧氏距离大于 q 和 o 之间的欧氏距离,所以用欧氏距离构造的 MST 会出现错误。但是,基于共享邻点的距离构建的 MST 正确地保留了原始数据集的结构。

1.3 算法流程

首先,使用局部密度峰值和基于共享邻点的距离来构建 MST;然后,重复切割最长的边(边的长度是采用基于共享邻点距离的),并保证切割该边导致的两个簇的大小都大于松散估计的最小点数,直到找到给定数量的簇为止。对局部密度峰值进行聚类后,将每个剩余点分配到与对应的局部密度峰值所属的相同类簇中。LDP - MST 算法主要包括以下步骤:1)搜索局部密度峰值;2)计算局部密度峰值之间基于共享邻点的距离;3)采用基于 MST 的聚类算法对局部密度峰值进行聚类。

2 LDP - MST 在电力大数据中的应用

如今,智能电网建设速度不断加快,与之而来的是大量的数据,这些数据主要来源于电网的发、输、配、用四大环节。聚类分析可以从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的数据中,提取隐含在其中的人们事先不知道但又具有潜在价值的信息。其中,最具有显著效果的聚类分析就是对用户用电行为的聚类 and 异常检测。用户用电行为聚类基于用户用电行为模式对相似性用户进行划分类别,而异常检测主要是指检测电力偷窃、电能表错误、计费错误等非技术损失造成的异常用电情况。

LDP - MST 算法在电力大数据领域具有良好的应用前景,尤其体现在异常值检测中。异常值检测的目标是将不属于任何簇的样本点与正常点进行区别,从数据的角度来说,就是找出样本点数量较小的簇。故使用 LDP - MST 算法将样本点较少的簇提取出来,就可以得到异常样本。为验证算法的实用性,以某网站 3 个月的访问量和网络流量为基础,使用 LDD - MST 算法检测了其中的异常值。

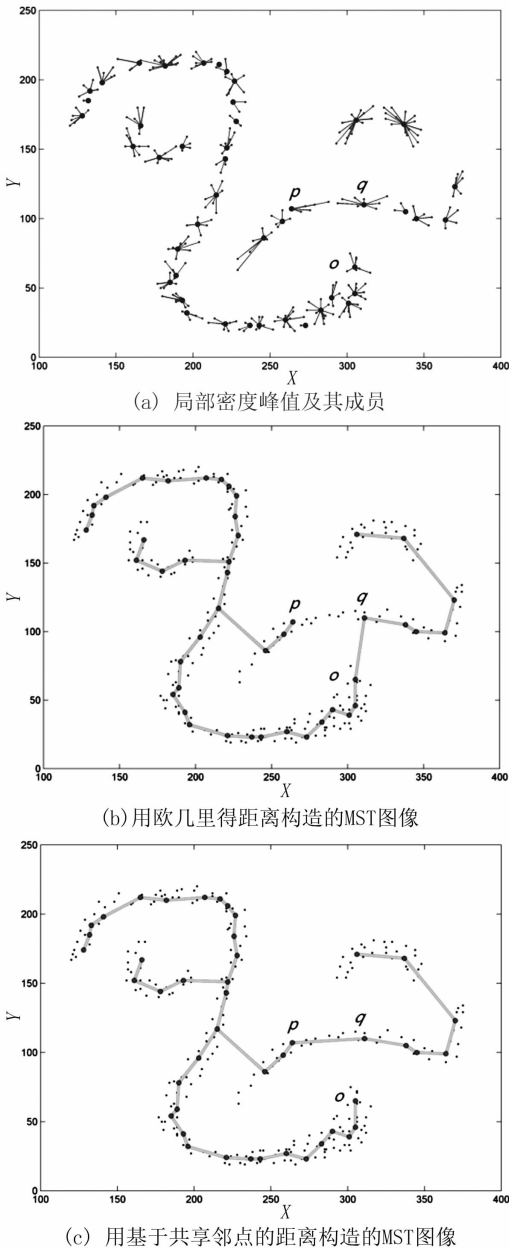


图 3 各个方法距离的区别

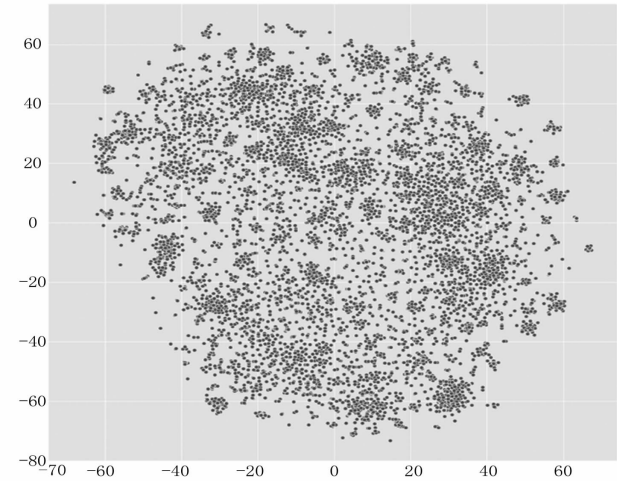


图 4 LDP - MST 算法聚类结果

在进行聚类之前,先对数据进行了预处理,即用缺失点外的其他值的均值代替该属性的缺失值。最终得到 LDP - MST 算法聚类结果如图 4 所示。由于只通过聚类法不容易用肉眼判别聚类结果,所以要对数据进行归一化处理。这里采取的归一化的方式为

$$\bar{P} = \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \tag{2}$$

图 5 为归一化处理后的数据。由图可以看出,在 3 月之初以及 4 月中后期有一些数据的网络流量与正常用户访问次数差距较大,明显偏离了正常数值。将这些异常值输出,并经聚类分析和异常值判定后,得到如表 1 所示的异常值分布。可发现所提算法将数据集中的异常值全部检测出来,说明 LDP - MST 算法对异常值检测具有比较良好的效果。

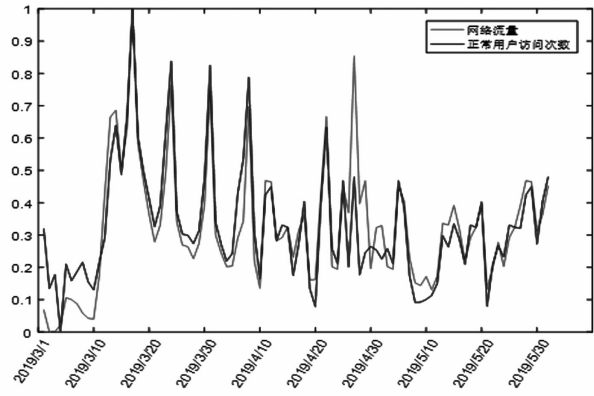


图 5 归一化处理后的数据分布

表 1 异常值数据分布

异常值标号	日期
1	3 月 1 日
3	3 月 3 日
58	4 月 26 日
59	4 月 27 日
60	4 月 28 日

3 结 语

上面提出了一种新的聚类算法 LDP - MST,其核心思想是选择局部密度峰值来构建 MST,避免了噪声点的干扰,减少了基于 MST 的聚类算法的运行时间。电力综合数据集的实验表明,该聚类算法能较好地识别数据集中的复杂模式,且比现有的聚类算法更有效。在进行电力大数据的异常检测时,算法在短时间内有效地检测出了异常结果。今后,将继续完善本算法的缺点以及将这一基于聚类算法的异常检测方法应用到电力系统的更多方面。

参考文献

[1] 王千,王成,冯振元,等. K - means 聚类算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2012,20(7):21 - 24.

[2] 周涛,陆惠玲. 数据挖掘中聚类算法研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2012,48(12):100 - 111.

[3] Zhang X, Wang W, Nrvg K, et al. K - AP: Generating Specified K Clusters by Efficient Affinity Propagation [C]// ICDM 2010, The 10th IEEE International Conference on Data Mining, Sydney, Australia, 2010.

[4] 陈春涛. 快速搜索与密度峰值发现算法的研究与应用[D]. 上海:华东师范大学,2019.

[5] Yeuang Chen, Shengyu Tang, Lida Zhou, et al. Decentralized Clustering by Finding Loose and Distributed Density Cores[J]. Information Sciences, 2016:433 - 434.

[6] 荣秋生,颜君彪,郭国强. 基于 DBSCAN 聚类算法的研究与实现[J]. 计算机应用, 2004,24(4):47 - 48.

[7] 陈恒飞. Chameleon 聚类算法研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.

[8] 崔凤山,刘博,贾凯,等. 用电采集系统电力大数据应用探究——电力数据看居民房屋空置率[J]. 农电管理,2021(2):28 - 29.

[9] 曹成,陶继群,郑湃. 基于 Kudu 的电力辅助设备实时监控业务解决方案[J]. 科技创新与应用,2021(8):130 - 134.

[10] 刘博,钱勇,沈阿美. 大数据技术视域下电力配电网智能运维管控系统研究[J]. 工业加热,2021,50(1):46 - 48.

[11] 葛一统,向锋铭,余桂华,等. 大数据背景下的电力营销信息化建设研究[J]. 华电技术,2021,43(1):76 - 82.

考虑多种运行状态的台区拓扑辨识

曾顺奇¹, 吴杰康², 李欣¹, 刘国新²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000;

2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:由于供电可靠性的要求提高以及电力用户的增加,导致配电网的规模和复杂程度不断加大,增大了配电网拓扑的难度与时间。因此,为了加快拓扑的速度,提出一种改进矩阵算法,将拓扑分为全局拓扑、局部拓扑,并对两种拓扑分别进行改进。针对全局拓扑,对邻接矩阵使用节点消去法,对连通矩阵使用行扫描法,对关联矩阵使用两次节点消去法,形成局部拓扑关联矩阵;全局拓扑后,针对变位断路器,进行局部拓扑。首先,根据遥信变化,获知网络中哪些断路器发生变位;再根据局部拓扑关联矩阵,得到变位断路器与局部网络节点的连接情况;最后,根据这些信息对连通矩阵进行局部修改并进行矩阵的行扫描、母线分析和电气岛分析,就可以得到网络的局部拓扑,进而反映网络的全局拓扑。该方法的可靠性高,适用范围广,并且可以充分提高拓扑计算的效率。

关键词:台区;拓扑辨识;全局拓扑;局部拓扑

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0020-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210405

Topology Identification of Power Distribution Area with Multi-operation Conditions

Zeng Shunqi¹, Wu Jiekang², Li Xin¹, Liu Guoxin²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000,

Guangdong, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology,

Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Due to the improvement of power supply reliability and the increase of power users, the scale and complexity of distribution network are increasing, which increases the difficulty and time of distribution network topology. Therefore, in order to speed up the topology identification, an improved matrix algorithm is proposed, which divides the topology into global topology and local topology, and improves the two topologies respectively. For global topology, node elimination method is used for adjacency matrix, row scanning method is used for connected matrix, and twice node elimination method is used for incidence matrix to form local topology correlation matrix. After global topology, local topology is carried out for displacement switch. Firstly, according to the change of remote signal, it is known which switches in the network are shifted. And then, according to local topology correlation matrix, the connection relationship between displacement switches and local network nodes is obtained. Finally, according to these information, the connection matrix is modified locally, and then the line scanning, bus analysis and electrical island analysis of the matrix are carried out to obtain the local topology of the network, which reflects the global topology of the network. The proposed method has a high reliability and wide application range, and can fully improve the efficiency of topology identification.

Key words: power distribution area (per transformer); topology identification; global topology; local topology

0 引言

配电网的拓扑辨识分析为电力系统的仿真、状

态估计、动态潮流计算和故障诊断等计算模块提供了基础的网路结构数据^[1],但随着城市人口数量的剧增以及人们对供电可靠性要求的日益提高,这导致了配电网接线的复杂程度与规模不断加大,进一步加大了配电网拓扑的难度,大大降低了配电网拓扑的效率。所以针对降低配电网拓扑难度,提高拓

扑效率的研究越来越多。

配电网拓扑辨识的实质就是根据网络中各个断路器的状态来判断网络中各个元件的连接关系,再将网络进行母线分析与电气岛分析^[2]。文献[1]运用了分布式网络拓扑并行加速的技术,将整个网络拓扑进行划分,由不同的服务器进行并行加速,充分提高了网络拓扑的效率。文献[2]针对邻接矩阵具有对称性,并将对称性应用到对邻接矩阵进行节点消去简化的过程中,相对于传统的矩阵法辨识,减少了一半左右的计算量,大大提高了拓扑效率。文献[3]针对邻接矩阵是稀疏矩阵,具有稀疏性,将稀疏矩阵技术应用到矩阵拓扑优化中提高拓扑效率。文献[4]针对邻接链表的储存图表示不够直观的缺点,提出了邻接矩阵染色法,使得拓扑过程直观、快速、有效。以上文献通过不同的方法对拓扑过程进行改进优化,也取得不错的效果,但是这些改进均局限于全局拓扑,而未对局部拓扑进行研究。当网络中某个断路器因为配电线路发生故障而导致变位,此时网络的结构可能发生了变化,需要重新拓扑,但直接进行全局拓扑会造成计算资源的浪费。因为变位断路器只影响同电压等级的母线形成^[5],即变位断路器只影响局部网络的拓扑,而非全局网络的拓扑。而且,在正常情况下,配电系统中多个断路器的状态同时发生变化的情况是极少的,就算是调度员进行调度,也不会一次性关断许多断路器,所以局部拓扑的适用范围广。文献[6]针对局部拓扑辨识,提出了树搜索法,以断路器断开的一端母线为起点进行树搜索,但并未考虑联络开关闭合的情况,这样会加大树搜索的难度,而且树搜索法面对配电网中复杂的节点和环网,拓扑时间也会大大加长,拓扑效率较差。因此,针对这些情况,需要对网络的局部拓扑进行研究。

综上所述,下面提出一种改进矩阵算法,将网络的拓扑辨识分为全局拓扑、局部拓扑两个过程,并对两种拓扑辨识分别进行改进。

1 考虑运行状态的全局拓扑辨识

矩阵法的全局拓扑辨识,即对得到的全连通矩阵进行分析,以此来对整个网络进行拓扑辨识。全局拓扑,首先将反映网络中节点-支路连接关系的关联矩阵与它的转置进行一次乘法运算得到邻接矩阵;然后使用邻接矩阵法,即对邻接矩阵进行最多次 $(n-1)$ 的自乘运算(n 为邻接矩阵的阶数),当任意

两次自乘运算得到的结果一致时,停止自乘运算,所得结果就是全局拓扑需要的全连通矩阵;最后对全连通矩阵进行行扫描、母线分析和电气岛分析,进而得到整个网络的拓扑分析。但是,当网络中节点数目非常多的时候,矩阵法需要占用大量的内存资源,而且拓扑速度变慢,拓扑效率变低。所以,要对矩阵法做出如下改进:

1)使用节点消去法代替邻接矩阵法来处理邻接矩阵,即对邻接矩阵中不重要的节点的行和列删除,只留下重要节点,减少邻接矩阵的阶数;

2)对使用节点消去法所求得的连通矩阵直接使用行扫描法,不要求取全连通矩阵。

通过这两个方面对矩阵法进行改进,可以很好地减少运算量,提高拓扑效率。

1.1 关联矩阵

在进行网络拓扑的过程中,可以用关联矩阵来表示网络中的连接情况。关联矩阵是描述网络中节点-支路(或者支路-节点)之间连接情况的矩阵。对于一个包含 n 个节点和 m 条支路的网络,可以用一个 $n \times m$ 阶矩阵 $A = [a_{ij}]$ 来表示,矩阵的每一行对应于网络中的一个节点,矩阵的每一列对应于网络中的一条支路。如图1所示的网络,从物理模型到数学模型的过程中,即从网络到关联矩阵的过程中,应该把网络中的节点作为关联矩阵的行,把网络中的支路作为关联矩阵的列。关联矩阵中的元素 a_{ij} 的取值表示节点 i 与支路 j 的连接情况。 $a_{ij} = 1$,即节点 i 与支路 j 相连接; $a_{ij} = 0$,则节点 i 与支路 j 不相连。

首先,进行全局拓扑的目的是获取整个网络的全局拓扑模型,为之后的局部拓扑提供必要的拓扑信息。所以,网络中所有的支路断路器(除联络断路器、厂站之间的支路断路器以及变压器之外)都默认为处于闭合状态。支路断路器状态矢量 S 为

$$S = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (1)$$

对于图1中网络,关联矩阵 A 为

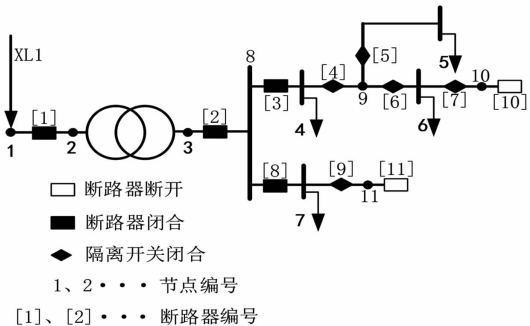


图1 正常的低配电网台区网络

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 邻接矩阵

1.2.1 邻接矩阵与关联矩阵的联系

邻接矩阵是描述网络图中节点-节点之间连接情况的矩阵。对于一个包含 n 个节点的网络,可以用一个 $n \times n$ 阶矩阵 $B = [b_{ij}]$ 来表示。如果两个节点之间通过一条支路直接连接,则 $b_{ij} = 1$, 否则 $b_{ij} = 0$; 而对角线的元素则恒等于 1, 即 $b_{ii} = 1$, 因此邻接矩阵一定是对称矩阵。因为相连节点之间是靠支路来连接的, 所以可以通过反映节点-支路连接关系的关联矩阵来得到相对应的邻接矩阵。对于有个 n 节点、 m 条支路的网络, 关联矩阵与邻接矩阵的运算式为:

$$B = A \cdot A^T \quad (3)$$

$$b_{ij} = \bigcup_{k=1}^m (a_{ik} \cap a_{jk}) \quad (4)$$

式中: A 为节点-支路的关联矩阵; B 为节点-节点的邻接矩阵。

对于图 1 中网络, 邻接矩阵 B 为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2.2 邻接矩阵的简化

在用矩阵法对网络进行拓扑时, 虽然矩阵的数据结构简单, 易于理解, 不受接线方式变化的影响,

适用于复杂的接线网络。但网络中的节点众多, 所形成矩阵的阶数十分大, 这将给存储空间带来巨大的压力, 使邻接矩阵自乘法的运算量呈爆炸式增长, 导致网络拓扑的速度变慢。而网络拓扑就是要求实时性, 所以需要矩阵法进行一些改进。

由于网络拓扑并不需要知道所有节点之间的连接情况, 其目标就是将重要节点(厂站之间的支路节点、变压器节点、供电电源节点、负荷节点)之间的连接情况反映出来。所以可以将剩下的节点消去降低邻接矩阵的阶数, 减轻存储压力, 加快拓扑速度。

若两个节点通过一条支路直接连接, 则称这种连接关系为一级连通关系; 若节点 i 和节点 j 通过节点 k 间接连接, 则称这种连接关系为二级连通关系, 以此类推。

如图 1 所示, 图中有 11 个节点, 其中属于重要节点的有 1、2、3、4、5、6、7, 也就是说, 只需要知道节点 1—7 的连接情况, 其他的节点都可以消去。将矩阵中的元素更新后, 就将矩阵中要消去节点的行和列删去, 则矩阵的阶数降低一阶。节点消去的运算式为

$$b'_{ij} = b'_{ii} = (b_{ik} \cap b_{jk}) \quad (6)$$

式中: b'_{ij} 、 b'_{ii} 为邻接矩阵中更新的元素, 因为邻接矩阵具有对称性; k 为将要被消去的节点; i, j 为与节点 k 相连接的节点。

邻接矩阵元素更新后, 将矩阵中的第 k 行、第 k 列删去。

若将节点 8 消去, 根据邻接矩阵 B 可知, 节点 3、节点 4、节点 7 这些重要节点通过节点 8 形成二级连通关系, 所以将节点 8 消去后, 可得矩阵 B' 为

$$B' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将 B' 所有不重要的节点都消去后, 就可得到连通矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 全连通矩阵

所得到的连通矩阵 C 并不是想要得到的全连通矩阵,还需对连通矩阵 C 进行最多 $(n-1)$ 次自乘运算 (n 为连通矩阵的阶数),当任意两次自乘运算的结果都一样时,则得到了全连通矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最后对全连通矩阵进行行扫描、母线分析和电气岛分析。

在上述步骤中,可以将求取全连通矩阵的步骤删去。因为对全连通矩阵进行行扫描,即是对矩阵中行向量的线性相关性进行判别,而这些行向量的线性相关性在所得到的连通矩阵中就已经存在了,而不是在求取全连通矩阵的过程中出现的。所以,可以直接对连通矩阵使用行扫描法。行扫描法的运算式为

$$C'(i) = C'(j) = [C(i) \oplus C(j)] \quad (10)$$

式中: $C(i)$ 、 $C(j)$ 为连通矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $C'(i)$ 、 $C'(j)$ 为连通矩阵中元素更新后的第 i 行行向量、第 j 行行向量。

通过直接对连通矩阵 C 使用行扫描法,就可以进一步减少矩阵法的运算量,减轻存储压力,加快拓扑速度。

通过对网络进行全局拓扑辨识,可以将图 1 网络分为两个部分,在进行母线分析时,每一部分形成一条母线。第一部分是(节点 1、2),编号为母线 1 号;另一部分是(节点 3、4、5、6、7),编号为母线 2 号。在进行电气岛分析时,将变压器以及厂站之间的支路视为闭合支路,即可得到整个网络的连通模型,如图 2 所示。通过观察图 2,发现母线 1 号、母线

2 号形成一个电气岛;然后返回到图 1,可以知道:进线 XL1,通过变压器向负荷 4、5、6、7 供电。



图 2 正常的网络连通模型

2 考虑故障状态的局部拓扑辨识

在网络拓扑的过程中,网络中的支路断路器会因为各种各样的原因,如线路发生故障、断路器本身发生故障、调度员调度等,使得断路器状态发生变化。断路器状态发生变化后,可能会使之前的网络全局拓扑模型发生变化,一般情况下,为了保险起见,只能对整个网络再进行一次全局拓扑。但是,当网络中节点数目太多时,则全局拓扑的速度就会变慢,时效性就比较差。如果能围绕状态发生变化的断路器进行局部拓扑,那么就可以节省拓扑时间,加快拓扑速度。

在网络的拓扑中,每个电气岛中的母线分为一个或几个电压等级,不同电压等级的母线之间是不能通过断路器直接连接的。所以,当网络中某个断路器状态发生变化时,只会对断路器所处电压等级的母线的拓扑造成影响,而不会对不同电压等级的母线造成影响。也就是说,断路器状态发生变化对网络拓扑的影响只是局部的。基于这一点,可以在断路器状态发生变化时,只对网络进行局部拓扑,而不是全局拓扑。这样就可以进一步减少拓扑时间,提升拓扑效率。

2.1 局部拓扑关联矩阵的形成

2.1.1 对关联矩阵进行第 1 次节点消去

在全局拓扑中获得的关联矩阵,如式(2)所示。关联矩阵表示配电网系统中节点-支路的连接关系。根据节点消去法的目的,即将矩阵中不重要的节点消去,降低矩阵的阶数,减少运算量。而关联矩阵中也存在许多不重要的节点,需对其行向量进行节点消去处理。但是对关联矩阵进行节点消去时,对重要节点的定义与邻接矩阵不尽相同,还要加上母线节点,即关联矩阵中的重要节点包括:厂站之间的支路节点、变压器节点、供电电源节点、负荷节点以及母线节点。

对邻接矩阵进行消去时,图 1 中的重要节点为节点 1—7,现在对关联矩阵进行节点消去时,重要

节点还需增加节点8、节点9这两个母线节点,所以需要消去的节点为节点10、节点11。对关联矩阵进行第1次节点消去处理的公式为

$$\mathbf{A}'(i) = [\mathbf{A}(i) \oplus \mathbf{A}(j)] \quad (11)$$

式中: j 为将要被消去的节点; i 为被留下的重要节点; $\mathbf{A}(i)$ 、 $\mathbf{A}(j)$ 为关联矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $\mathbf{A}'(i)$ 为关联矩阵中元素更新后的第 i 行行向量。

关联矩阵元素更新后,将矩阵的第 j 行进行删去处理。

所以,对关联矩阵进行第1次节点消去处理后,可以得到关联矩阵 $\mathbf{A}'$ 为

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.1.2 对关联矩阵进行第2次节点消去

当得到关联矩阵 $\mathbf{A}'$ 后,就可以对这个关联矩阵进行第2次节点消去,将矩阵中的母线节点消去,即将节点8、节点9进行消去处理。对关联矩阵进行第2次节点消去处理的公式为

$$\mathbf{A}''(i) = [\mathbf{A}'(i) + \mathbf{A}'(j)] \quad (13)$$

式中: j 为将要被消去的母线节点; i 为被留下的重要节点; $\mathbf{A}'(i)$ 、 $\mathbf{A}'(j)$ 为关联矩阵中行向量的第 i 行、第 j 行,且线性相关; $\mathbf{A}''(i)$ 为关联矩阵中元素更新后的第 i 行行向量。

关联矩阵元素更新后,将矩阵的第 j 行进行删去处理。

所以,对关联矩阵进行第2次节点消去后,可以得到关联矩阵 $\mathbf{A}''$ 为

$$\mathbf{A}'' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

关联矩阵 $\mathbf{A}''$ 的行代表网络中的重要节点,列代表网络中的支路断路器。矩阵任意一行中,元素值不为0且相等的行,表示支路断路器与这些节点直接相连,以矩阵的第1列为例,断路器[1]处于关断状态时,节点1与节点2断开连接;矩阵任意一行中,元素值不为0且不相等的行,元素值最大的行表示与支路断路器直接相连的节点,以矩阵的第2列为例,断路器[2]处于关断状态时,节点3与节点4之间、节点3与节点7之间断开连接。

2.2 局部拓扑关联矩阵的使用

配电网系统中任意一个断路器都可能会因为各种各样的原因导致断路器状态发生改变,进而可能导致系统的拓扑发生变化,这时可以通过遥信获取故障断路器的信息,根据局部拓扑关联矩阵,针对变位断路器进行一次局部拓扑即可。

2.2.1 获取变位断路器信息

假设图1的网络出现异常情况,网络中断路器[3]、断路器[4]状态发生改变,从闭合状态变为关断状态,如图3所示。

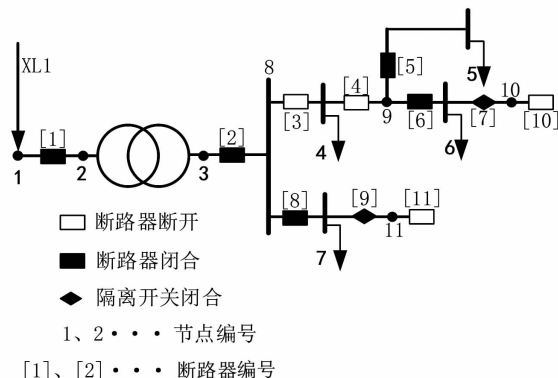


图3 异常的配电网台区网络

通过遥信获取的当前网络支路断路器状态矢量 $\mathbf{S}'$ 为

$$\mathbf{S}' = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (15)$$

通过与初始支路断路器状态矢量 $\mathbf{S}$ 形成对比,很容易发现网络中的断路器[3]、断路器[4]状态发生变化。

2.2.2 获取变位断路器连接信息

当知道网络中断路器[3]、断路器[4]状态发生变化后,可通过局部拓扑关联矩阵 $\mathbf{A}''$,获取变位断路器的连接信息。

由变位断路器[3]对应矩阵的第3列,可知节点4与节点3之间、节点4与节点7之间断开连接;由变位断路器[4]对应矩阵的第4列,可知节点4

与节点5之间、节点4与节点6之间断开连接。

2.2.3 对连通矩阵进行局部修改

当知道变位断路器的连接信息后,就可以根据所得到的信息,对连通矩阵 C (如式(8)所示)进行局部修改,得到修改后的连通矩阵 C' 为

$$C' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(16)

2.2.4 对连通矩阵直接进行矩阵行扫描

由于连通矩阵 C' 与全连通矩阵 T' 相同,所以直接对连通矩阵 C' 进行母线分析,可以将图3网络分为4部分。第1个部分为(节点1、2),编号为母线1号;第2部分为(节点3、7),编号为母线2号;第3部分为(节点4),编号为母线3号;第4部分为(节点5、6),编号为母线4号。进行电气岛分析,即可得到断路器[3]、断路器[4]状态发生变化的异常网络连通模型,如图4所示。通过观察图4,发现母线

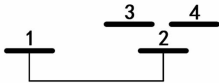


图4 异常的网络连通模型

1号、母线2号形成一个电气岛,母线3号和母线4号分别形成一个电气岛;然后返回到图3,可以知道:进线XL1,通过变压器,向负荷7供电;负荷4连接的配电线路可能发生故障,所以被隔离开来,需要电力部门进行检修;负荷5、负荷6处于停电状态,调度员可以根据局部拓扑关联矩阵 A'' ,对最近的联

络开关(断路器[10])进行道闸操作,恢复供电,保证供电的可靠性。

通过局部拓扑辨识,可以发现网络中断路器状态发生变化,只会影响电压等级相等的母线,而不会影响到电压等级不相等的母线,所以,当网络中断路器状态发生变化时,对网络进行局部拓扑是可行的。通过局部拓扑来代替全局拓扑,可以大大提高网络拓扑的效率。

3 算例分析

如图5所示的配电网台区网络,该配电网台区网络中包含45个节点、47个断路器。首先,对该网络进行全局拓扑,全局拓扑流程如图6所示。

然后,将节点消去法的运算量与邻接矩阵法的运算量进行对比。其中邻接矩阵法在最坏的情况下需要进行 $(n-1)$ 次自乘运算,所以对于图5中的网络,邻接矩阵法的最大运算量为4 009 500次。但是通过仿真可知,邻接矩阵法只需要进行20次自乘运算即可得到全连通矩阵,则邻接矩阵法的实际运算量为1 822 500次。图5中的网络,有13个重要节点,即节点1—13,所以利用节点消去法将其余的节点消去。

表1列出了针对图5的网络求取全连通矩阵所用方法的运算量。

表1 邻接矩阵法与节点消去法运算量的比较			
网络中重要节点数	邻接矩阵法运算量	节点消去法运算量	两种运算量比例
13	1 822 500	25 801	70.7:1

注:一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

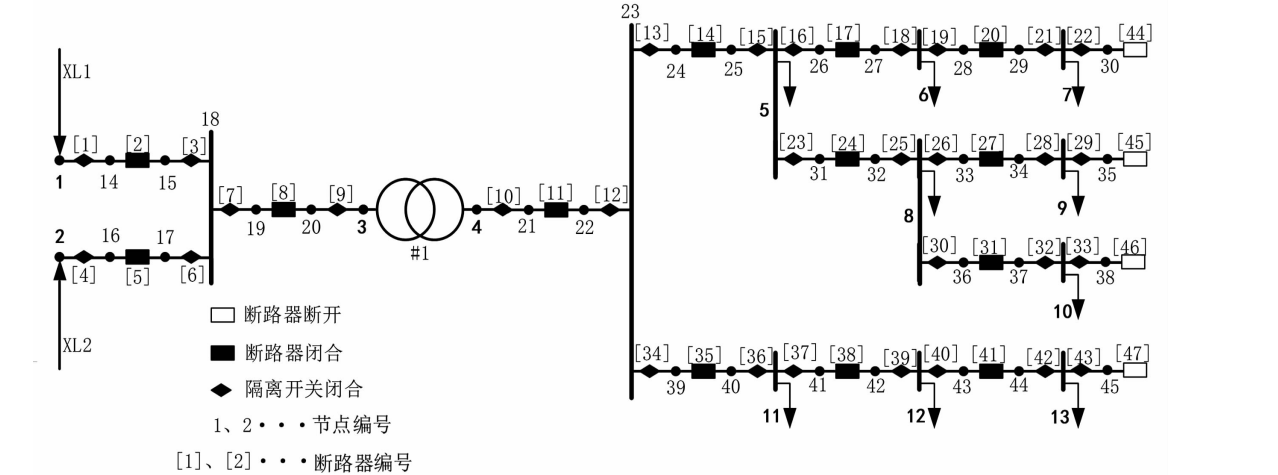


图5 配电网台区网络

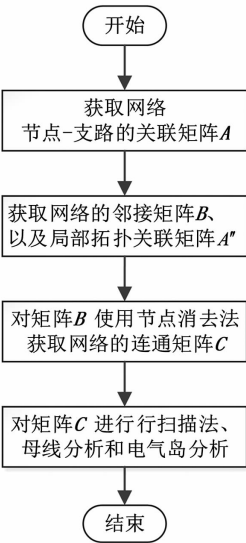


图 6 全局拓扑流程

表 2 列出了采用节点消去法所获得的连通矩阵 C 用不同的方法进行母线分析和电气岛分析的运算量。

表 2 间接行扫描法与直接行扫描运算量的比较

连通矩阵	自乘及 行扫描法	直接 行扫描法	运算量比例
C	11 258	1248	9.02:1

注：一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

表 3 列出了求取局部拓扑关联矩阵 A'' 时,第 1 次节点消去以及第 2 次节点消去的运算量。针对图 5 网络,第 1 次节点消去需要将除重要节点 1—13 以及母线节点 18 和母线节点 23 之外的节点消去;第 2 次节点消去再将母线节点 18、母线节点 23 消去。

表 3 关联矩阵节点消去法运算量

关联矩阵	第一次 节点消去法	第二次 节点消去法	总运算次数
A	20 445	1269	21 714

注：一次“或”和“与”运算分别作为一次运算。

全局拓扑完毕后,针对网络中状态发生变化的断路器进行局部拓扑,局部拓扑的流程如图 7 所示。

表 4 列出了针对图 5 网络中断路器状态发生变化时,进行全局拓扑、局部拓扑仿真得到准确结果所用的时间。

表 4 全局拓扑与局部拓扑的仿真时间

拓扑类型	仿真时间/ms
全局拓扑	65
局部拓扑	25

通过仿真结果,节点消去法相对于邻接矩阵法,可以减少许多的运算量;直接对连通矩阵使用行扫描法是可行的,相对于连通矩阵自乘获取全连通矩阵再进行行扫描来说,也可以减少一定的运算量;针

对图 5 中的网络使用局部拓扑所用的时间是全局拓扑的 1/3 左右,使拓扑的效率更高了。

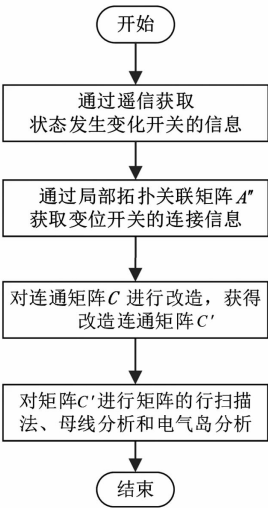


图 7 局部拓扑流程

4 结 语

对配电网台区用矩阵法进行拓扑辨识,针对矩阵法拓扑辨识存在的运算量大、拓扑效率低的问题,提出了解决方案。通过全局拓扑、局部拓扑两个方面来解决这些问题。针对以往全局拓扑中最耗时的邻接矩阵法,选择用节点消去法来替代;然后,对从全连通矩阵到行扫描法、母线分析和电气岛分析的过程进行简化;最后,针对关联矩阵进行两次节点消去,获取局部拓扑关联矩阵,大大减小了全局拓扑运算量。全局拓扑后,在网络中断路器状态发生变化时,对断路器进行局部拓扑,虽然仿真结果显示局部拓扑用时是全局拓扑的 1/3 左右,效果并不算特别好,这是由于所选网络节点数少以及网络结构简单所导致的。如果选用节点数多、结构复杂的网络,则全局拓扑时间会大大加长,这时,局部拓扑的优势就能体现出来了。

参考文献

[1] 王健,陈威,汤卫东,等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(2): 117-122.

[2] 郭帅文,燕跃豪,蒋建东,等. 基于邻接矩阵的网络拓扑辨识算法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12): 50-56.

500 kV 高压单芯电缆并联运行关键技术研究

白亦斓¹, 涂 扬², 李珊珊¹, 李龙才¹, 邹家勇¹, 周 特¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 401121)

摘 要:随着线路负荷的不断上升,越来越多的单芯电缆线路采用同相多根并联的运行方式,而并联回路电流如何均匀分配始终是制约电缆同相并联运行的关键问题。通过对同相并联电缆等效电路的建模,推导了高压单芯电缆并联运行方式下各并联回路序阻抗的关系方程,并通过理论推导得出“镜像”布置方案可实现同相并联电缆间互阻抗相等,从而使同相并联电缆获得最佳均匀通流效果。在此基础上,依托某 500 kV 新建变电站工程,采用有限元法计算同相并联电缆在不同的空间布置方案下,单芯电缆同相并联运行时的电流分配特性。有限元计算结果表明,同相电缆的镜像布置方案可有效降低电缆电流的不平衡分配参数,提升并联电缆利用率。最后,结合常规地下/半地下 500 kV GIS 出线条件给出了推荐布置方案。

关键词:地下/半地下 GIS 变电站;高压单芯电力电缆;同相多根并联;序阻抗参数;布置优化

中图分类号:TM 751 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0027-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210406

Research on Key Technology of Parallel Operation of 500 kV High-voltage Single-core Cable

Bai Yilan¹, Tu Yang², Li Shanshan¹, Li Longcai¹, Zou Jiayong¹, Zhou Te¹

(1. CPECG Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Construction Branch, Chongqing 401121, China)

Abstract:As the line load continues to rise, more and more single-core cable lines adopt the operation mode of same-phase multiple parallel connections, and how to evenly distribute the parallel circuit current has always been a key issue restricting the parallel operation of the cable in phase. Through the analysis of circuit topology of the same-phase parallel cable line, the calculation method of sequence impedance parameters of each parallel circuit during the in-phase parallel operation of the high-voltage cable is given. Then, the mirror layout scheme can be used to achieve equal mutual impedance between the same phase parallel cables, so as to obtain a uniform flow effect in cables. On this basis, supported by a new 500 kV substation project, finite element method is used to calculate the current distribution characteristics of two parallel running lines of the same phase of the single-core cable under different spatial layout schemes. The calculation results show that the mirror layouts can effectively reduce the unbalanced distribution parameters and improve the utilization of high-voltage single-core cable. Finally, combined with the outlet conditions of the conventional underground or semi-underground 500 kV GIS substations, the recommended layout scheme for parallel operation of two cables in the same phase is given.

Key words:underground or semi-underground 500 kV GIS substation; high-voltage single-core power cable; multiple same-phase cables in parallel; sequence impedance parameter; optimal layout scheme

0 引 言

近年,国内各大城市范围内涌现出地下或半地下变电站^[1-2],城市地下/半地下变电站线路走廊狭窄,尤其是 220 kV 及以上高压线路出线条件更为艰

难。因此,城市变电站多采用高压电缆出线替代传统架空线出线方式^[3]。随着用电负荷的持续上升,为满足线路输送能力的要求,在实际工程设计中,通常采取单相多根高压单芯电缆并联的运行方式^[4]。而在实际运行中,发现同沟平行敷设的多回电缆相互之间电磁耦合关系较强,导致并联运行的同相电

缆线路中各分支电流并不相等,存在严重不平衡^[5-6],甚至出现了因电流分配不均匀使并联电缆过热击穿的严重事故^[7-8]。因此针对单芯高压电缆并联运行研究其载流平衡措施,可大幅提高并联电缆的传输能力,延长并联电缆的寿命周期,显著提升输电系统供电可靠性。

文献[7]和文献[8]分别报道了电缆并联运行带来的绝缘击穿问题,并对电缆并联运行带来的通流不平衡进行了定性分析;但没有对电缆并联运行方式下序阻抗参数的分布等问题进行全面和深入的理论分析。文献[9-10]揭示了同相电缆并联运行方式下基于矩阵变化的序阻抗参数,但理论分析与电缆布置方案缺乏有效结合,仅通过有限元仿真验证了电缆“品”字形布置方式较常规平行敷设的电流均分效果更优。文献[11]在“品”字形布置方式优点的基础上结合水平交叉布置,提出了优化后的“水平交叉-品字形”复合式敷设方式,电流的不平衡分布得到明显改善。

下面针对高压单芯电缆同相并联运行方式,以“导线-大地”回路参数计算为基础,根据多回电缆线路序阻抗参数计算方法,结合理论分析得出并联电缆“镜像”布置时电流均分效果最优的结论,并通过有限元计算验证了采用所提“镜像”布置方案可实现电缆并联运行电流均分效果最优。

1 同相多根电缆并联运行拓扑分析

采用每相 n 根并联的单芯电缆等效电路拓扑见图 1。对图 1 中所示并联电路而言,电源内阻抗值以及负载侧等效阻抗值可认为远超电缆阻抗值,因此,当系统运行于工频电压时,可近似认为负载侧阻抗决定着回路电流的幅值、相位。因此相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 由系统相电压 E_A 、 E_B 、 E_C 以及负荷阻抗 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 决定。

对于图 1 中的第 i 根电缆,其电流 I_i 由电缆首尾压差 ΔU_i 和电缆阻抗 Z_i 确定,即 $I_i = \Delta U_i / Z_i$ 。电缆阻抗由电缆自阻抗和相邻电缆间互阻抗组成。电缆电气参数决定了电缆自阻抗大小,当采用同型号电缆时,单位长度电缆自阻抗相同。不过,电缆间互阻抗与自阻抗不同,与每根电缆流经的电流向量和电缆空间排布相关,当电缆中通过的电流大小、相位和相对位置发生改变时,互阻抗将随之改变^[5-6]。考

虑到并联电缆首尾压差相同,自阻抗亦近似相等,于是电缆中电流向量主要取决于电缆互阻抗的大小。因此,下面将进一步分析电缆导体阻抗参数的计算方法。

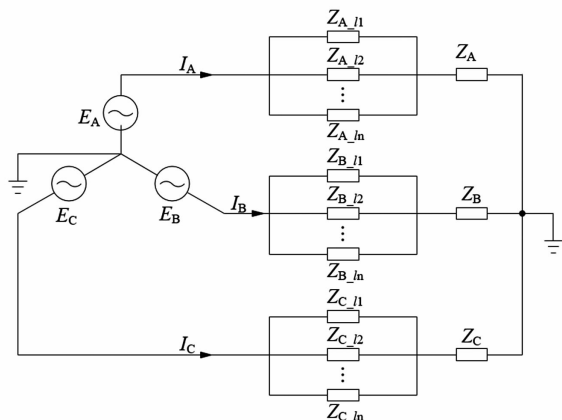


图 1 每相 n 根电缆并联运行简化电路

2 同相多根电缆并联运行阻抗计算

电缆参数主要包括各序对地电容参数和各序阻抗参数。通常 500 kV 高压电力电缆均采用单芯结构;同时为避免环流,单芯电力电缆的金属屏蔽层一般采用单点接地或者交叉互联接地的运行方式,各相电缆之间不存在电场影响,所以多回电缆的阻抗计算方法与单回一致^[10]。因此,将以单芯电缆金属屏蔽层单点接地方式为例对并联电缆进行序阻抗参数的分析计算。

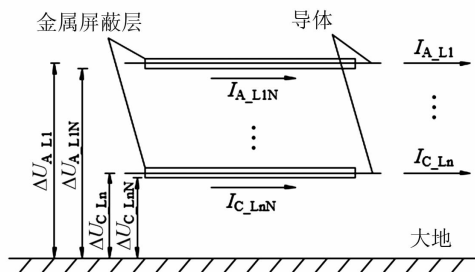


图 2 n 根电缆并联系统回路

将电缆外屏蔽层与内层导体同等看待,如图 2 所示,屏蔽层和导体均与大地构成回路,于是图 2 中 n 根电缆线路共有 $6n$ 个“导体-大地”回路。这 $6n$ 个回路的电压降可以简单表述为

$$\Delta U_{6n \times 1} = Z_{6n \times 6n} I_{6n \times 1} \quad (1)$$

式中: $\Delta U_{6n \times 1} = [\Delta U_{A,1} \Delta U_{B,1} \Delta U_{C,1} \cdots \Delta U_{A,Ln} \Delta U_{B,Ln} \Delta U_{C,Ln}]^T$; $Z_{6n \times 6n}$ 为阻抗矩阵; $I_{6n \times 1}$ 为 $6n$ 个回路的电流矩阵, $I_{6n \times 1} = [I_{A,1} I_{B,1} I_{C,1} \cdots I_{A,Ln} I_{B,Ln} I_{C,Ln}]^T$ 。

$I_{C_LnN}]^T$;下标 A、B、C 表示相别;下标 L1、L2...Ln 为并联电缆回路序号;下标 N 代表屏蔽层。

$Z_{6n \times 6n}$ 组成部分可分为 3 类:“导体-大地”回路自阻抗 Z_s 、“屏蔽层-大地”回路自阻抗 Z_{Ns} 和“导体-大地”回路与“屏蔽层-大地”回路间的互阻抗 Z_m ,其计算公式^[12]如式(2)一式(5)所示。

“导体-大地”回路自阻抗(Ω/km)为

$$Z_s = R_L + R_g + j0.144 \, 51 \lg\left(\frac{D_g}{r}\right) \quad (2)$$

式中: R_L 为电缆导体单位长度电阻; R_g 为大地等值电阻, $R_g = \pi^2 \times f \times 10^{-4} = 0.049 \, 3 \, \Omega/\text{km}$; D_g 为以大地为回路时等值回路的深度, $D_g = 660 \sqrt{\rho_e/f}$; r 为导体等值半径; D 为各相导线间距。

“屏蔽层-大地”回路自阻抗(Ω/km)为

$$Z_{Ns} = R_N + R_g + j0.144 \, 51 \lg\left(\frac{D_g}{r'}\right) \quad (3)$$

式中: R_N 为屏蔽层单位电阻; r' 为屏蔽层几何半径。

屏蔽层与导体均处同相电缆时“屏蔽层-大地”与“导体-大地”回路间互阻抗(Ω/km)为

$$Z_m = R_g + j0.144 \, 51 \lg\left(\frac{D_g}{r'}\right) \quad (4)$$

屏蔽层与导体处不同相时,“屏蔽层-大地”回路与“导体-大地”回路间互阻抗(Ω/km)为

$$Z_m = R_g + j0.144 \, 51 \lg\left(\frac{D_g}{D}\right) \quad (5)$$

“屏蔽层-大地”回路间互阻抗和“导体-大地”回路间互阻抗均可通过式(5)求取。

金属屏蔽层单点接地时,“屏蔽层-大地”回路中电流为 0,即 $I_{A_LnN} = I_{B_LnN} = I_{C_LnN} = 0$,其中 $i = 1, 2 \dots n$ 。此时可化简省去式(1)中屏蔽层相关项,将式(1)简化为 $3n$ 阶矩阵方程。

$$\Delta U_{3n \times 1} = Z_{3n \times 3n} I_{3n \times 1} \quad (6)$$

式中: $\Delta U_{3n \times 1} = [\Delta U_{A_L1} \, \Delta U_{B_L1} \, \Delta U_{C_L1} \dots \Delta U_{A_Ln} \, \Delta U_{B_Ln} \, \Delta U_{C_Ln}]^T$; $I_{3n \times 1} = [I_{A_L1} \, I_{B_L1} \, I_{C_L1} \dots I_{A_Ln} \, I_{B_Ln} \, I_{C_Ln}]^T$ 。

当 $n = 2$ 时,将式(6)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{A_L1} \\ \Delta U_{A_L2} \\ \Delta U_{B_L1} \\ \Delta U_{B_L2} \\ \Delta U_{C_L1} \\ \Delta U_{C_L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{A1A1} & \dots & Z_{A1C2} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{C2A1} & \dots & Z_{C2C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A_L1} \\ I_{A_L2} \\ I_{B_L1} \\ I_{B_L2} \\ I_{C_L1} \\ I_{C_L2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

考虑并联电缆首尾两端压差相等,可得

$$\begin{cases} \Delta U_{A_L1} = \Delta U_{A_L2} = \dots = \Delta U_{A_Ln} \\ \Delta U_{B_L1} = \Delta U_{B_L2} = \dots = \Delta U_{B_Ln} \\ \Delta U_{C_L1} = \Delta U_{C_L2} = \dots = \Delta U_{C_Ln} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),可化简为三阶矩阵方程:

$$\Delta U_{3 \times 1} = Z_{3 \times 3} I_{3 \times 1} \quad (9)$$

根据对称分量法进行变化,得到

$$Z'_{3 \times 3} = S Z_{3 \times 3} S^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $a = e^{j120^\circ}$; Z_{11} 为线路正序

阻抗; Z_{22} 为线路负序阻抗; Z_{00} 为线路零序阻抗。

$Z_{3 \times 3}$ 阻抗矩阵计及了其他各回电缆导体,包括外层金属屏蔽层对该回电缆的互感影响,能够说明本回电缆端电压与回路电流间的准确关系。

进一步,在同相并联电缆导体两端电压相等的条件下,若要并联电缆中每个支路电流均分,即 $I_{A_L1} = I_{A_L2}$, $I_{B_L1} = I_{B_L2}$ 以及 $I_{C_L1} = I_{C_L2}$,则并联回路中的每根电缆受到互阻抗影响效果相同,可有如下关系:

$$\begin{cases} Z_{A1B1} = Z_{A2B2}; Z_{A1B2} = Z_{A2B1} \\ Z_{A1C1} = Z_{A2C2}; Z_{A1C2} = Z_{A2C1} \\ Z_{A1A2} = Z_{A2A1}; Z_{B1C1} = Z_{B2C2} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)并结合空间布置可知,当且仅当并联电缆位置完全镜像时,可满足每根电缆互阻抗影响效果相同。为验证所提理论分析结论,依托某 500 kV 新建变电站工程进行验证。

3 500 kV 高压电缆同相并联运行案例分析

某新建 500 kV 变电站,规划要求其 2 回 500 kV 出线在市区内采用电力电缆,线路走廊约为 2 km。根据系统要求,500 kV 出线载流量需满足不小于输送电流 4000 A。经电缆载流量计算^[13],并向国内外电缆厂家核实,受制造能力约束,目前 500 kV 电缆产品截面最大为 2500 mm²,其载流量最大约 2449 A。该工程即使采用最大载流电缆产品也无法匹配工程输送容量,因此考虑每相电缆采用两根并联的运行方式。根据第 2 章中理论分析,不同并联电缆布置方案下电缆互感参数不同将造成并联回路电流的分配不

平衡,最终影响高压电缆运行性能,因此特设计 6 种不同布置方案验证上述理论分析。首先对 500 kV 高压单芯电缆建模,并在此基础上针对不同布置方案进行有限元计算,验证理论分析结论,最终结合实际工程户内 GIS 布置形式,给出推荐的电缆出线布置方案。

3.1 500 kV 高压单芯电缆建模

空气中的电缆结构一般可简化为 5 个部分:空气、电缆外护层、金属屏蔽层、电缆内绝缘层、电缆导体,简化结构如图 3 所示。

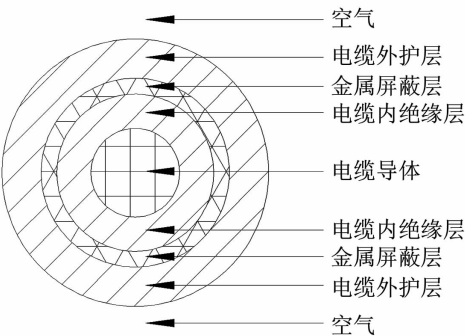


图 3 单芯电缆结构模型

考虑到电缆并联运行可以看作工频似稳电磁场,因此有限元模型做如下简单处理^[14]:1)考虑电缆敷设长度远远大于电缆直径,采用二维瞬态场进行有限元计算;2)导体的电导率为常数;3)忽略铁磁物质的磁滞效应。

3.2 同相 2 根电缆并联运行分析

导体材质、导体连接质量和各电缆间互感均会对电缆阻抗造成一定程度的影响^[15-16]。根据第 1 章中分析可知,同相并联电缆间存在不同载流现象主要由各回电缆间互阻抗存在差异造成。而电缆的空间排布会对各电缆的互感造成显著影响。因此可以通过优化空间布置,削弱电缆间互感影响,达到同相并联电缆载流平衡。以截面 2500 mm²、型号 YJTLW02-290/500 的铜芯交联聚乙烯绝缘电力电缆为例(电缆结构参数详见表 1),建立上述电缆有

限元简化模型,对同相 2 根 500 kV 单芯电缆的并联运进行场路耦合计算,并考虑电缆在不同布置方案下的运行效果。

图 4 为 2 根电缆并联运行方式下的不同排列方案,各方案中相邻电缆间隔均与电缆外径 $D=170\text{ mm}$ 相同。方案 1 为最常见的电缆水平敷设方案,同相两根电缆相邻,一字排开水平敷设;方案 2 至方案 6 则是考虑互感影响载流量的优化布置方案,其中方案 3 为横向镜像布置,方案 4 为竖向镜像布置,方案 5 为“品”字形对称布置,方案 6 位“品”字形镜像布置。

表 1 500 kV 单芯电缆结构参数 单位:mm

电缆参数	数值
导体半径	28.2
内绝缘层半径	60
金属屏蔽层内径(外径)	60(61)
外护层半径	85

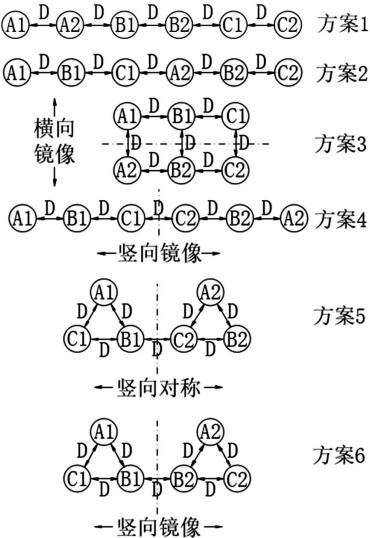


图 4 同相 2 根电缆并联运行方式下布置方案

经有限元计算,得到不同布置方案下不同电缆的载流量,见表 2。表 2 中, I_{A1} 、 I_{A2} ... I_{C1} 、 I_{C2} 分别代表各相 2 根并联电缆载流量。

为更清楚地表示同相 2 根电缆并联运行下并联

表 2 不同布置方案下 2 根电缆并联运行载流量 单位:A

方案	I_{A1}	I_{A2}	I_{B1}	I_{B2}	I_{C1}	I_{C2}
1	1 669.42	2 354.75	2 105.08	2 141.33	2 326.90	1 687.00
2	1 753.59	2 264.82	1 993.44	2 016.35	2 267.21	1 749.02
3	1 999.93	1 999.93	1 999.97	1 999.97	2 000.02	2 000.01
4	1 999.96	1 999.98	1 999.93	1 999.98	2 000.00	2 000.00
5	1 997.85	2 008.38	2 172.52	1 837.16	1 841.54	2 169.14
6	1 999.94	1 999.90	1 999.59	1 999.67	1 999.59	1 999.57

电缆载流量的不平衡现象,表 3 给出了不同布置方案下各相不平衡系数。表中: $k_A = \left| 1 - \frac{I_{A1}}{I_{A2}} \right|$; $k_B =$

$\left| 1 - \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \right|$; $k_C = \left| 1 - \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right|$; $k_{total} = \frac{k_A + k_B + k_C}{3}$ 。

表 3 不同布置方案下各相载流量不平衡系数

方案	k_A	k_B	k_C	k_{total}
1	0.291	0.017	0.379	0.229
2	0.226	0.012	0.296	0.178
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0.005	0.183	0.151	0.113
6	0	0	0	0

由表 2、表 3 可以看出:采取布置方案 1 时,同相并联电缆间电流分配极不均衡,电缆载流量总不平衡系数最大;方案 2 较方案 1 载流量不平衡现象有所改善;而镜像布置方案 3、方案 4 则展现出优秀的电流均衡特性。因此,若采用布置方案 1、方案 2,会导致正常运行方式下系统输送容量大幅度降低,甚至出现部分电缆处于长期重载状态而造成过热击穿的问题,严重威胁输电系统运行可靠性。若采用方案 3、方案 4 所提镜像布置方案,两根同相并联电缆的载流量不平衡系数均接近于 0,具有最佳的电流均分效果。

而对于文献[9]和文献[11]提出的能够有效均匀分配电流的“品”字形布置,则亦设置了方案 5 和方案 6 两个布置方式作为对比。当采取“品”字形对称布置方案 5 时,三相电流不平衡系数由常规“一”字型布置方式下的 0.291、0.017、0.379 分别变化至 0.005、0.183、0.151,总不平衡系数由 0.229 下降至 0.113,降幅达 49.3%。通过有限元计算结果表明,“品”字形布置方案可有效改善电流均分效果,但仍存在电流不平衡现象。而当采取所提“镜像”布置方案 6 时,并联支路电流均分效果同上述镜像方案 3、方案 4,其不平衡系数降低至 0,具有最佳的电流均分效果。

3.3 500 kV GIS 电缆并联出线优化布置方案

市内变电站配电装置一般采用户内 GIS 型式,电缆出线终端与 GIS 电缆罐相连。布置方案 4 为“一”字排开,镜像排列,将会带来设备连接和空间布置上的困难。方案 6 为镜像的“品”字型排列,给电缆终端和 GIS 电缆罐的连接带来接口上的困难。

因此在实际工程应用中推荐采用方案 3 作为同相电缆并联的敷设方式。采用布置方案 3 的 GIS - 电缆出线平断面如图 5 所示。

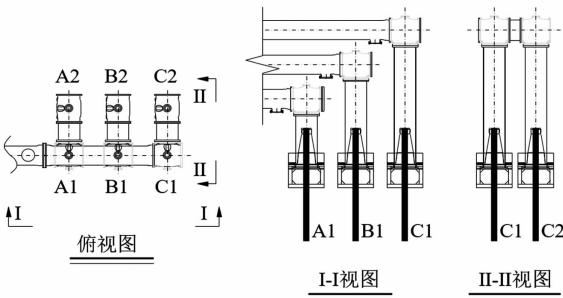


图 5 采用优化布置方案 3 的 GIS - 电缆出线平断面

4 结 语

上面从 500 kV 高压单芯电缆同相多根并联运行实际需求出发,以电路拓扑为基础,给出了同相多根并联运行方式下各回电缆线路序阻抗计算方法,并通过理论推导得出“镜像”布置方案可实现同相并联电缆间互阻抗相等,从而使同相并联电缆获得最佳均匀通流效果。在上述理论分析的基础上,依托某 500 kV 新建变电站工程,采用有限元计算并分析不同布置方案下的同相 2 根电缆并联运行的电流分配特性,验证了所提“镜像”布置方案下电流均分效果最优的结论。最终,结合常规地下/半地下 500 kV GIS 出线条件给出了同相电缆 2 根并联方式下的推荐布置方案。

参考文献

[1] 倪镭,唐宏德,曹林放,等. 上海城市地下变电站设计建设回顾与展望[J]. 华东电力,2011,39(8):1320 - 1323.
[2] 荀旭丹. 城市地下变电站相关问题探讨[J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 64 - 66.
[3] 苏巍,明安持. 多回路电缆布置优化的研究[J]. 高电压技术,2006,32(11):64 - 66.
[4] 韩晓鹏,李华春,周作春. 同相两根并联大截面交联电缆敷设方式的探讨[J]. 高电压技术,2005,31(11):66 - 67.
[5] 陈建忠,陆正荣,张洁. 中高压单芯电缆并联时感应电压和电流不平衡系数[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009(5):13 - 17.
[6] 邓星,蒙绍新,尹项根,等. 多回并联电缆线路参数的不对称性分析[J]. 高电压技术,2010,36(12):3119 - 3124.
[7] 徐应麟,马国栋. 某热电站一号发电机组至一号变压器电缆局部焦烧原因调查分析[C]//中国电工技术学

会电线电缆专业委员会年会,2000.

[8] F Freschi, M Tartaglia. Power Lines Made by Many Parallel Single Core Cables: A Case Study[C] // IEEE Industry Applications Conference, 2006:2230 – 2237.

[9] 樊友兵, 赵健康, 钱康, 等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2607 – 2612.

[10] 王育学, 张哲, 尹项根, 等. 平行多回电缆序阻抗参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8):186 – 191.

[11] 刘渝根, 尚龙龙, 田金虎, 等. 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联敷设方式优化研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12):25 – 32.

[12] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.

[13] 鲁志伟, 于建立, 郑良华, 等. 交联电缆集群敷设载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(2):481 – 487.

[14] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度

场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):185 – 190.

[15] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1 – 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General: IEC 60287 – 1 – 1[S], 2014.

[16] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1 – 3: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Current sharing between parallel single – Core cables and calculation of circulating current losses: IEC 60287 – 1 – 3[S], 2002.

作者简介:

白亦斓(1990), 女, 工程师, 主要研究方向为特高压变电站电气设计;

周 特(1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特高压变电站电气设计。

(收稿日期:2021 – 01 – 21)

(上接第 15 页)

型 CVT 黑盒模型, 利用矢量匹配法、宏观无源化和福斯特 II 型等效电路建立了 π 型等值电路的 CVT 模型。为了验证该模型是否能够在宽频暂态电压的条件下表征 CVT 的端口特性, 通过网络分析仪测量 CVT 的 S 参数, 得到 π 型等值电路的 CVT 模型的各个元件参数后, 对 CVT 进行雷电过电压试验, 在已知 CVT 高压输入雷电波形的情况下利用支路电流法列写方程, 计算得到 CVT 二端口的输出波形。最终比较计算波形和测量得到的波形, 二者近似相同, 验证了所建立的 CVT 宽频暂态模型的正确性。

参考文献

[1] 杜欣宇. 电容式电压互感器宽频无源电路模型的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.

[2] Dean A Frickey. Conversions Between S, Z, Y, h, ABCD, and T Parameters which are Valid for Complex Source and Load Impedances[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(2):205 – 211.

[3] Morched A, Gustavsen B, Tartibi M. A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):1032 – 1038.

[4] 张喜乐, 梁贵书, 董华英, 等. 变压器绕组的特快速暂态建模[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3):55 – 59.

[5] 张重远, 徐志钮, 律方成, 等. 电压互感器的高频无源

电路模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):77 – 82.

[6] B Gustavsen, A Semlyen. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):1052 – 1061.

[7] B Gustavsen. Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3):1587 – 1592.

[8] D Deschrijver, M Mrozowski, T Dhaene, et al. Macromodeling of Multiport Systems Using A Fast Implementation of the Vector Fitting Method[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(6):383 – 385.

[9] Adam Semlyen, Bjørn Gustavsen. A Half – size Singularity Test Matrix for Fast and Reliable Passivity Assessment of Rational Models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):345 – 351.

[10] 赵京生. 10 kV 电力变压器严格无源暂态电路模型建立方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.

[11] 吴仕军, 吴安坤, 邵莉丽, 等. 基于 Bergeron 模型的变电站雷电入侵分析[J]. 科技创新与应用, 2017(21):6 – 8.

作者简介:

潘 飞(1997), 男, 硕士, 主要从事高电压方向的研究工作;

穆 舟(1991), 男, 博士, 主要从事电力系统暂态过电压测量技术的研究工作。

(收稿日期:2021 – 05 – 28)

适用于 GIL – 架空混合线路距离保护的整定方法

洪巧章

(南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510530)

摘要:将 GIL 段串入架空线路后, 线路阻抗特性会发生变化, 对于阻抗参数敏感的距离保护, 其保护范围会发生变化。为了使原有架空线路保护装置能够可靠保护混合线路, 在理论分析的基础上, 通过修改距离保护定值来维持保护装置保护范围, 使得原架空线路保护装置在 GIL – 架空混合线路工况下仍然适用。计算方法在 PSCAD 仿真模型中得到了验证。

关键词:GIL – 架空混合线路; 距离保护; 整定计算

中图分类号:TM 773 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954(2021)04 – 0033 – 05

DOI:10.16527/j.issn.1003 – 6954.20210407

Setting Method for Distance Protection of GIL Hybrid Overhead Lines

Hong Qiaozhang

(China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co., Ltd.,
Guangzhou 510530, Guangdong, China)

Abstract:After stringing the GIL section into an overhead transmission line, the impedance characteristics of the line will change. For the distance protection sensitive to impedance parameters, the protection range will change. In order to make the original overhead line protection device reliably protect the mixed line, a method to maintain the protection scope of the protection device is proposed by modifying protection parameters of the distance protection, and the proposed method is verified in the PSCAD simulation model.

Key words:GIL hybrid overhead line; distance protection; setting calculation

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated line, GIL)是一种采用 SF₆ 气体或 SF₆ 和 N₂ 混合气体绝缘、金属外壳与导体同轴布置的高电压大电流电力传输设备。由于 GIL 输电具有输电容量大、受环境影响小、安全可靠性能高等优良性能, 成为复杂地形高压大容量输电的首选方案^[1-5]。

考虑到 GIL 的成本较高, 所以仅在复杂地形处采用 GIL 线路, 其余部分采用均匀架空线路的混合送电方案在现阶段具有更高的经济指标和实用价值。

将 GIL 段引入架空线路后, 线路阻抗特性会发生变化, 对于距离保护, 其保护范围也会发生变化^[6-8]。为了使原有架空线路保护装置能够可靠保

护混合线路, 下面在理论分析的基础上, 修改距离保护定值计算方法, 维持保护装置保护范围不变, 并在 PSCAD 仿真中对该方法进行了验证。

1 GIL – 架空混合线路建模仿真

首先, 针对 GIL 输电线路的建模方法进行研究, 在建立准确描述 GIL 几何及电气特性的等效模型后, 进一步对 GIL – 架空混合线路的故障特性进行仿真与分析。这里以 500 kV 输电线路为例进行分析研究。

1.1 GIL 线路建模

GIL 的几何结构如图 1 所示, 由内到外分别为芯线、绝缘气体以及外壳。其中, 芯线为高电导率的铝合金材质, 考虑集肤效应, 芯线按中空设计; 外壳为铝

合金材质,与芯线同轴布置,芯线与外壳间填充 SF₆ 气体。各层的厚度随其电压等级的提升而增大。

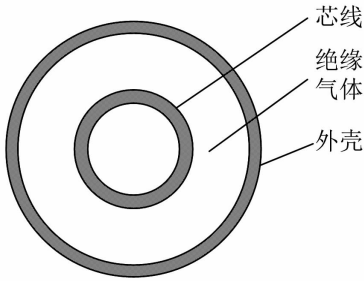


图 1 GIL 结构
500 kV GIL 通用的结构参数见表 1。

参数	数值
金属外壳尺寸/mm	内径 554/外径 570
芯线导体尺寸/mm	内径 150/外径 180
电阻率/(Ω·m ⁻¹)	金属外壳 4×10 ⁻⁸ 芯线 4×10 ⁻⁸
相对磁导率	金属外壳 1/芯线 1
相对介电常数	绝缘气体 1

注:真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; 真空的介电常数 $\epsilon_0 = 8.854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

为实现对芯线的电磁屏蔽和保障故障时人身和设备的安全,GIL 的金属外壳会进行接地处理。在 GIL 的沿线装设接地铜排,每隔一段距离用接线线将三相 GIL 外壳接到接地铜排上,然后接地铜排的两端分别接地。典型 GIL 外壳接地方式如图 2 所示。

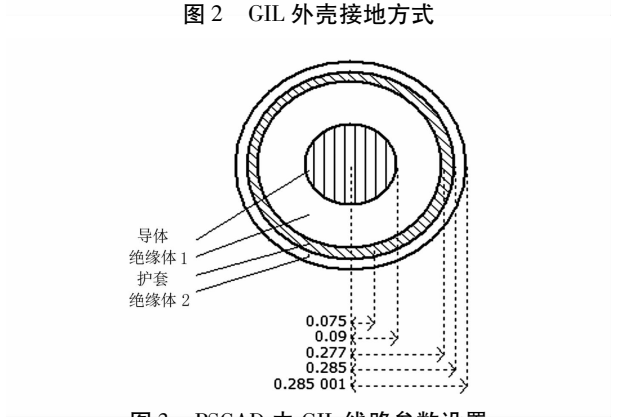
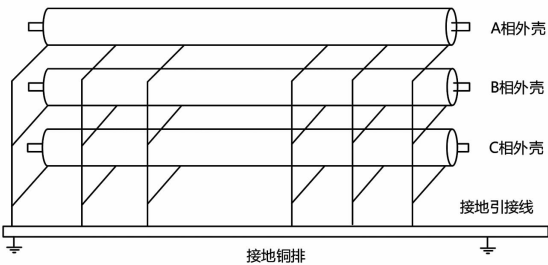


图 3 PSCAD 中 GIL 线路参数设置

行模拟,设置为 C1 | II | C1 类型,与 GIL 对应的结构即为:金属芯线 | 气体绝缘层 | 金属外壳,同时该模型的芯线可设置为中空的形式,与 GIL 的芯线保持一致。各层通过电气参数来体现其电气特性,其模型截面如图 3 所示。

1.2 GIL – 架空混合线路建模

架空线采用 PSCAD 中的 Transmission Lines 模块,该模型可详细模拟架空输电线路的杆塔、导线和底线的参数。采用频率模型搭建 GIL – 架空混合线路中架空线路段的模型,架空线的几何参数根据实际参数进行设定。

2 GIL – 架空混合线路故障仿真

GIL 段对线路阻抗的影响与 GIL 段占整条线路的比例有关,GIL 比例越大,混合线路的阻抗特性与原架空线路的参数差距就越大,对继电保护功能的影响也就越大,需要结合工程参数具体分析。下面以某实际工程参数为例进行分析。

双回线 GIL – 架空混合线路如图 4 所示,GIL 段离终端站 1 的母线 15 km,终端站 2 母线的 9.5 km,长 6 km,分析安装在终端站 1 处的距离保护,将故障点设置在距离终端 2 母线 4.5 km 处(线路全长的 85% 处)。

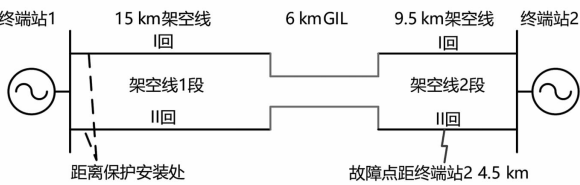


图 4 双回线 GIL – 架空混合线路

2.1 阻抗测量

距离保护测量保护安装点至故障点之间的阻抗,并根据阻抗的大小判断保护是否动作,包括相间距离元件和接地距离元件。在不同故障类型条件下,距离元件的测量阻抗值与故障距离成正比,从而实现具有一定保护长度范围的线路保护。

对于三相短路、两相(如 A、B 两相)短路和两相(如 A、B 两相)接地短路,故障点至保护安装点的测量阻抗均按照式(1)计算。

$$Z_m = \frac{\dot{V}_{mab}}{\dot{I}_{mab}} = Z_{L1} \cdot m \tag{1}$$

式中: Z_m 为测量阻抗; V_{mah} 为保护安装处 AB 相间测量电压; I_{mah} 为保护安装处 AB 相测量电流差; Z_{L1} 为单位长度正序阻抗; m 为保护安装处到故障点的线路长度。

对于单相接地短路(如 A 相),故障点至保护安装点的测量阻抗按照式(2)计算。

$$Z_m = \frac{\dot{V}_{ma}}{(\dot{I}_{ma} + k \cdot 3\dot{I}_{ma0})} = Z_{L1} \cdot m \quad (2)$$

式中: V_{ma} 为保护安装处 A 相测量电压; I_{ma} 为保护安装处 A 相测量电流; I_{ma0} 为保护安装处零序测量电流; k 为零序电流补偿系数, $k = (Z_0 - Z_1)/3Z_1$ 。

故障类型不同时,保护安装处的测量阻抗计算公式有所不同。保护装置首先需要判断故障相别,然后根据相应故障相的测量阻抗计算公式计算出测量阻抗。

分别就均匀架空线路以及 GIL – 架空混合线路进行 PSCAD 仿真,对于距离保护 I 段范围临界处(离终端站 2 电源母线 4.5 km),模拟 4 种不同类型的故障,分别得到保护测量处的故障电压电流并计算得到测量阻抗值,如表 2 所示。

故障类型	表 2 故障阻抗测量 单位:Ω	
	测量阻抗	
	均匀架空	GIL – 架空混合
单相接地	1.547 3 + j7.232 7	1.235 8 + j6.158 0
两相短路	1.113 7 + j7.725 1	1.084 4 + j6.611 7
两相接地	1.347 6 + j7.428 4	1.191 3 + j6.381 7
三相接地	1.347 6 + j7.428 4	1.191 3 + j6.381 7

通过搭建的阻抗测量模型计算结果显示,相比于原有均匀架空线路,GIL – 架空混合线路的阻抗更小,如采用原有保护定值,会造成保护范围扩大。

2.2 动作特性

常见的阻抗继电器动作特性包括阻抗圆动作特性和多边形阻抗动作特性。在 500 kV 电压等级中,输电线路的负荷电流往往很大,采用躲避故障负荷能力较强的多边形阻抗继电器更为适合。阻抗继电器多边形动作特性如图 5 所示。

图 5 中多边形为阻抗继电器的动作特性边界,如果测量阻抗落在多边形内部则保护动作,落在外部则不动作。为防止阻抗偏移造成保护拒动,多边形阻抗继电器在第二、第四象限需进行修正。

图 5 中: X_s 和 R_s 通过阻抗整定值和设定的角

度求得; α_4 的设置是为了防止区外经过渡电阻短路时出现稳态超越造成误动; Z_{Lmin} 为系统最小负荷阻抗; φ_L 为负荷阻抗角; Z_{op} 为负荷阻抗角时多边形阻抗继电器的阻抗整定值,它比 Z_{Lmin} 小,以防止系统在最小负荷阻抗情况下保护误动; Z_{set} 为线路阻抗的整定值; φ_d 为线路的阻抗角,距离 I 段的线路阻抗整定值应能保护线路全长的 80% ~ 85%,动作出口不设时延,时限为保护固有时限;距离 II 段与下一段线路的距离 I 段配合以保护本段线路全长,动作时限与相邻线路距离 I 段配合;距离 III 段按照躲开正常运行时的最小负荷阻抗来整定,动作时限与下一段线路的距离 III 段配合。

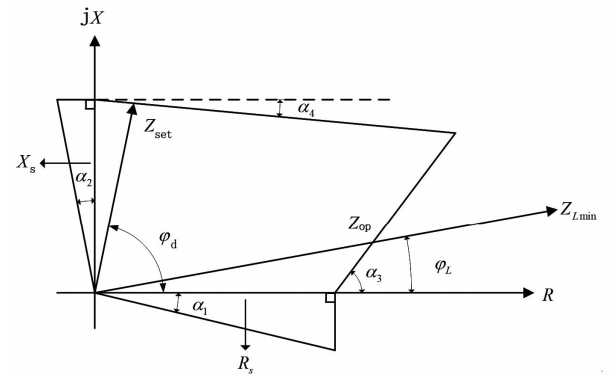


图 5 多边形阻抗继电器动作特性

2.3 定值校验

根据均匀架空线正序参数和线路长度可以计算出距离保护 I 段和 II 段的均匀架空线路阻抗整定值。最小负荷阻抗 Z_{Lmin} 按 20° ~ 30° 核算,线路保护定值如表 3 所示。

表 3 均匀架空线距离保护定值 单位:Ω	
类别	参数
最小负荷阻抗 Z_{Lmin}	11.056 0 + j5.274 4
负荷阻抗整定值 Z_{op}	9.397 6 + j4.483 24
R_s	6.809 2
I 段阻抗整定值 $Z_{set I}$	0.586 21 + j6.837 9
X_{sI}	6.910 9
II 段阻抗整定值 $Z_{set II}$	1.055 2 + j12.308 1
X_{sII}	12.439 6
III 段阻抗整定值 $Z_{set III}$	5.039 8 + j2.404 3
X_{sIII}	3.032 0

通过表 3 定值及表 2 阻抗测量值,可以计算图 5 的特性边界条件,均匀架空线路及 GIL – 架空混合线路的动作判别边界条件分别见表 4 和表 5。

离终端站 2 母线 4.5 km 处,对于安装于终端站 1

表 4 均匀架空线路距离保护判定边界条件

单位:Ω

故障类型	测量阻抗 $R_m + jX_m$	计算下限 $R_1 + jX_1$	计算上限(距离Ⅰ段) $R_{uⅠ} + jX_{uⅠ}$	计算上限(距离Ⅱ段) $R_{uⅡ} + jX_{uⅡ}$
三相短路	0.643 1 + j7.444 3	-1.994 6 - j0.172 2	11.107 0 + j6.830 9	11.107 0 + j12.359 6
单相短路	1.293 3 + j6.872 3	-1.841 3 - j0.346 5	10.776 8 + j6.749 8	10.776 8 + j12.278 5
两相对地短路	0.643 1 + j7.444 3	-1.994 6 - j0.172 2	11.107 0 + j6.830 9	11.107 0 + j12.359 6
两相短路	0.649 2 + j7.444 4	-1.995 7 - j0.173 8	11.109 9 + j6.830 0	11.109 9 + j12.358 7

表 5 GIL-架空混合线路距离保护判定边界条件

单位:Ω

故障类型	测量阻抗 $R_m + jX_m$	计算下限 $R_1 + jX_1$	计算上限(距离Ⅰ段) $R_{uⅠ} + jX_{uⅠ}$
三相短路	0.562 3 + j5.668 1	-1.518 7 - j0.150 6	10.081 6 + j6.840 9
单相短路	1.030 2 + j5.489 3	-1.470 8 - j0.276 0	9.978 3 + j6.782 6
两相对地短路	0.562 3 + j5.668 1	-1.518 7 - j0.150 6	10.081 6 + j6.840 9
两相短路	0.562 3 + j5.668 5	-1.518 7 - j0.150 8	10.081 6 + j6.841 0

的距离保护,约为线路全长的 85%。从表 4 可以看出,若此处发现各类短路故障,距离保护Ⅰ段不动作、距离保护Ⅱ段动作。这是由于在设计保护定值时,将Ⅰ段距离保护的 保护范围按 85% 整定, 此处 在 保 护 范 围 外, 因 此 距 离Ⅰ段不动作、距离Ⅱ段动作。

GIL-架空混合线路通过表 5 可以看到,距离Ⅰ段动作,说明距离Ⅰ段保护范围扩大。如果 GIL 短路比重较大,Ⅰ段保护范围甚至可以超过线路全长,距离保护丧失选择性。因此,对于 GIL-架空混合线路,距离Ⅰ段保护定值需重新设计。

2.4 GIL-架空混合线路Ⅰ段定值设计

计及 GIL 段的混合架空线路距离Ⅰ段定值计算如式(3)或式(4)。

$$Z_{setⅠ} = Z_o \cdot l_{oⅠ} + Z_{GIL} \cdot l_{GIL} + Z_o \cdot l'_{o2} \tag{3}$$

$$Z_{setⅠ} = Z_o \cdot l_{oⅠ} + Z_{GIL} \cdot (0.85l - l_{oⅠ}) \tag{4}$$

式中: $Z_{setⅠ}$ 为Ⅰ段阻抗整定值; Z_o 为架空线单位长度正序阻抗; Z_{GIL} 为 GIL 线路单位长度正序阻抗; l 为线路全长; $l_{oⅠ}$ 为第一段架空长度; l_{o2} 为第二段架空长度; l_{GIL} 为 GIL 线路长度。

式(3)用于 85% 线路中已包含全部 GIL 线路的工况,式(4)用于 85% 线路外仍设置有 GIL 线路的工况。所仿真案例可利用式(3)计算得到进行 GIL 改造后的距离保护定值,如表 6 所示。

通过 PSCAD 仿真,采用修正的距离保护Ⅰ段定值,寻找各类保护动作的临界距离,可以得到表 7。通过表 7 不难发现,修正的距离保护定值能满足距离Ⅰ段保护本线路全长 85% 的基本需求。

表 6 适用于 GIL-架空混合线路的距离Ⅰ段定值

单位:Ω

类别	参数
最小负荷阻抗 Z_{Lmin}	11.056 0 + j5.274 4
负荷阻抗整定值 Z_{op}	9.397 6 + j4.483 24
R_s	6.809 2
Ⅰ段阻抗整定值 $Z_{setⅠ}$	0.461 17 + j5.500 54
$X_{sⅠ}$	5.557 98
Ⅱ段阻抗整定值 $Z_{setⅡ}$	0.830 11 + j9.900 97
$X_{sⅡ}$	10.004 37
Ⅲ段阻抗整定值 $Z_{setⅢ}$	5.039 8 + j2.404 3
$X_{sⅢ}$	3.032 0

表 7 GIL-架空混合线路距离保护判定边界条件

单位:Ω

故障类型	测量阻抗 $R_m + jX_m$	计算下限 $R_1 + jX_1$	计算上限(距离Ⅰ段) $R_{uⅠ} + jX_{uⅠ}$	计算上限(距离Ⅱ段) $R_{uⅡ} + jX_{uⅡ}$
三相短路	0.562 3 + j5.668 1	-1.518 8 - j0.150 7	10.081 7 + j5.487 92	10.081 7 + j9.934 33
单相短路	1.030 2 + j5.489 3	-1.470 9 - j0.276 0	9.978 4 + j5.429 66	9.978 4 + j9.876 05
两相对地短路	0.562 3 + j5.668 1	-1.518 8 - j0.150 7	10.081 7 + j5.487 92	10.081 7 + j9.934 33
两相短路	0.562 3 + j5.668 5	-1.518 8 - j0.150 7	10.081 7 + j5.487 92	10.081 7 + j10.081 7

2.5 仿真结果分析

可以将第 3.3 节、第 3.4 节的分析用阻抗继电器动作特性图进行总结,采用原距离保护定值的均匀架空线路、GIL – 架空混合线路的继电器动作特性如图 6、图 7 所示。采用改进距离保护定值的 GIL – 架空混合线路的继电器动作特性如图 8 所示。

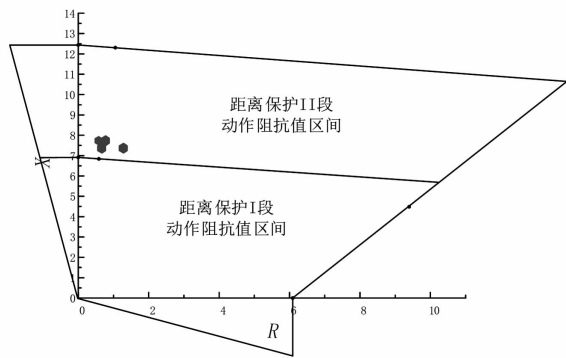


图 6 采用原定值的均匀架空线路
继电器动作特性

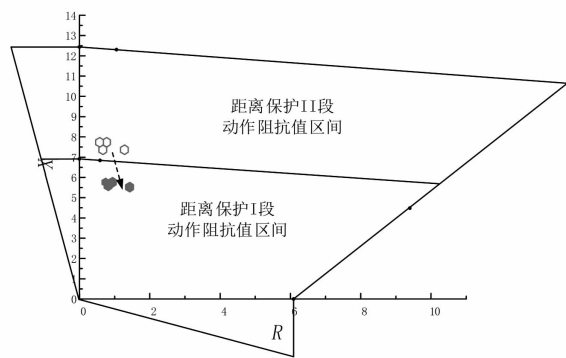


图 7 采用原定值的 GIL – 架空混合线路
继电器动作特性

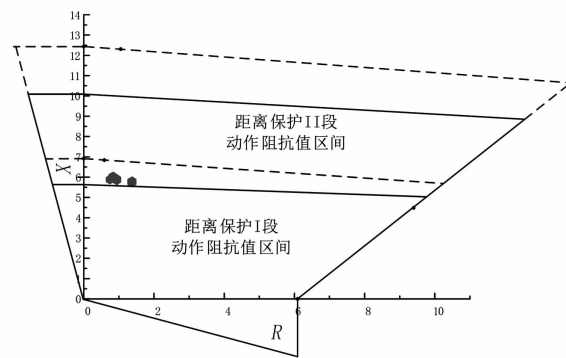


图 8 采用改进定值的 GIL – 架空混合线路
继电器动作特性

可以看到,将 GIL 段引入到架空线路后,无论是单相、两相、两相接地还是三相故障的测量阻抗均

发生不同程度的减小,从距离保护 II 段动作区移动到距离保护 I 段动作区。改进定值保护算法后,距离保护 I、II 段定值区域发生不同程度的缩小,故障测量阻抗重新移动回距离保护 II 段动作区。验证了该保护整定方法的有效性。

3 结 语

将 GIL 段引入架空线路后,线路阻抗特性会发生变化,对于阻抗参数敏感的距离保护,其保护范围也会发生变化。为了使原有架空线路保护装置能够可靠保护混合线路,在理论分析的基础上,通过修改距离保护定值来维持保护装置保护范围,使得原架空线路保护装置在 GIL – 架空混合线路工况仍然适用。所提计算方法在 PSCAD 仿真模型中得到了验证。仿真结果表明,定值修正方法准确可靠,能满足工程实施要求。

参考文献

- [1] 尚涛,李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术,2011,5(1):81 – 84.
- [2] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466 – 1473.
- [3] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力,2008,41(8):38 – 43.
- [4] 刘兆林. 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路在华东电网的应用[J]. 华东电力,2005(12):81 – 83.
- [5] 张健康,栗小华. 超高压线路后备保护整定原则探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(8):120 – 125.
- [6] Botong Li, Tianfeng Gu, Bin Li, et al. A New Principle of Distance Protection for the UHV GIL – overhead Hybrid Line Based on Frequency Domain Lossless Transmission Line Equation[J]. Energise,2019,12(23):1 – 12.
- [7] 谷天峰. 特高压 GIL – 架空混联线路继电保护技术研究[J]. 天津:天津大学,2018.

作者简介:

洪巧章(1984),男,PMP 项目经理,主要从事电网工程质量管理、工程咨询和技术应用的研究工作。

(收稿日期:2021 – 01 – 22)

基于一维卷积神经网络的电力系统 暂态稳定在线评估

齐 放

(中国广核新能源控股有限公司, 北京 100000)

摘 要:传统电力系统暂态稳定评估基于时域仿真计算,计算复杂度高,难以在线应用。提出一种基于一维卷积神经网络的电力系统暂态稳定在线评估,可极大提升暂态稳定在线评估速度。通过马尔可夫链蒙特卡洛抽样算法进行电力系统运行状态模拟,生成大规模运行数据。通过电力系统时域仿真计算确定发电机最大功角差。将电力系统运行数据作为一维卷积神经网络的输入,发电机最大功角差作为输出,训练一维卷积神经网络。在线应用场景下,一维卷积神经网络可基于当前运行数据快速计算发电机最大功角差,实现暂态稳定性在线评估。新英格兰 39 节点系统验证了所提在线评估算法的可行性。

关键词:电力系统;暂态稳定在线评估;一维卷积神经网络;马尔可夫链蒙特卡洛抽样算法;发电机最大功角差;新英格兰 39 节点系统

中图分类号:TM 721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0038-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210408

Online Transient Stability Assessment of Power System Based on One-dimensional Convolutional Neural Network

Qi Fang

(CGN New Energy Holdings Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract:Traditional transient stability assessment of power system is based on time domain simulation calculation, which has high computational complexity and is difficult to be applied online. An online transient stability assessment method based on one-dimensional convolutional neural network is proposed, which can greatly improve the speed of online transient stability assessment. Markov chain Monte Carlo sampling algorithm is used to simulate power system operation state and generate large-scale operation data. The maximum power angle difference of generator is determined by time domain simulation of power system. The operation data of power system is taken as the input of one-dimensional convolutional neural network, and the maximum power angle difference of generator is taken as the output to train the one-dimensional convolution neural network. In the online application scenario, one-dimensional convolutional neural network can quickly calculate the maximum power angle difference of generator based on the current operation data to realize online transient stability assessment. The New England 39 bus system verifies the feasibility of the proposed online evaluation algorithm.

Key words:power system;online transient stability assessment; one-dimensional convolutional neural network; Markov chain Monte Carlo sampling algorithm; maximum power angle difference of generator; New England 39 bus system

0 引 言

近年来,由于暂态失稳所引发的电力系统事故时有发生,对社会和经济产生极大的危害。然而,传统电力系统暂态稳定计算基于时域仿真,包含复杂

的微分代数方程,在大电网中计算复杂,难以进行暂态稳定在线评估与风险预警^[1-4]。

近年来,机器学习技术被引入电力系统暂态稳定评估中,通过非线性方程替代复杂微分代数方程计算,加速暂态稳定评估速度,以满足在线应用需求。文献[5]提出了暂态稳定安全域的概念,并在

安全域下提出基于多支持向量机的综合电力系统暂态稳定评估方法,可减少暂态失稳场景的误判。文献[6]中离线数据通过相量测量单元 PMU 采集得到,并通过串行集成多棵回归树构建基于 XGBoost 的暂态稳定预测模型,实现暂态稳定特征重要度排序关系,提高了模型的可解释性。文献[7]将概率神经网络和径向基函数神经网络结合,形成复合神经网络,并用于故障临界切除时间裕度的预测,提升预测精度。文献[8]将深度置信网络作为黑盒模型拟合发电机出力和系统暂态稳定系数间映射关系,实现暂态稳定评估。文献[9]直接基于底层数据,将堆叠自动编码器引入电力系统暂态稳定评估中,采用“预训练-参数微调”的两阶段学习方法和稀疏化技术提升暂态稳定评估准确度。

下面提出一种基于一维卷积神经网络(one dimensional convolutional neural network, 1DCNN)的电力系统暂态稳定在线评估方法,将在图像学习中广泛应用的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)引入电力系统暂态稳定评估中,相较于传统神经网络方法,有更强的抽象拟合能力,并且 1DCNN 是传统 CNN 的一维形式,更适合电力系统数据的学习。

1 样本生成

1.1 马尔可夫链蒙特卡洛抽样

马尔可夫链是一个序列模型,其中数据样本之间存在依赖关系,且时刻 t 的状态概率只与前一时刻 $t-1$ 的状态有关。在马尔可夫链中有状态转移矩阵,状态概率矩阵本身通过一定次数的矩阵乘法后,转移矩阵每一行的概率会趋向于稳定的值,称为马尔可夫链的平稳分布,即^[10-12]:

$$P(x_t | x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_1) = P(x_t | x_{t-1}) \quad (1)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P^n = \pi(x) \quad (2)$$

式中: P 为状态转移矩阵; x 为样本; π 为平稳概率分布; n 为转移次数,当接近无穷时, P 接近 π ,即达到平稳分布。

马尔可夫链蒙特卡洛抽样算法(Markov chain Monte carlo sampling algorithm, MCMC)是马尔可夫链和蒙特卡洛抽样的结合。设给定的初始样本为 x_0 ,根据马尔可夫链的收敛性质,经过一定次数的矩阵连乘后, x 的采样概率都会收敛到一个平稳分布,

设为 $\pi(x)$,则后续所有样本均服从概率分布 $\pi(x)$ 。MCMC 是从 x_{n+1} 开始的采样(设 n 为矩阵连乘次数):

$$\pi_{t+1}(x^*) = \int_x \pi_t(x) P(x^* | x) dx \quad (3)$$

式中, x^* 为新样本。 $\pi_{t+1}(x^*)$ 和 $\pi_{t+1}(x)$ 同分布。

实际中采用经典的 MCMC 采样的 Metropolis Hasting 算法进行采样:

1) 初始化:初始化 t_0 时刻样本为 x_0 ,所需抽样的样本总数为 M 。

2) 循环:

(1) 从均匀分布 $U(0, 1)$ 中采样 u ;

(2) 从概率分布 $q(x^* | x_i)$ 中采样样本 x^* ;

(3) 如果: $u < \min\left(1, \frac{\pi(x^*)q(x | x^*)}{\pi(x)q(x^* | x)}\right)$,

则 $x_{i+1} = x^*$, 否则 $x_{i+1} = x_i$;

(4) 当所生成样本数达到 M ,结束循环。

3) 结束:得到基于 MCMC 采样的 Metropolis Hasting 算法采样结果。

1.2 基于 MCMC 的电力系统运行数据生成

电力系统包括 PV 节点、PQ 节点和 Vθ 节点,以电力系统潮流计算和时域仿真计算的初始参数为所需抽样的特征参数,因此所考虑的电力系统特征包括:发电机有功出力、发电机节点电压、有功负荷和无功负荷。根据所研究电力系统模型的特征,设置各个特征变量的取值范围,然后通过 MCMC 抽样算法抽样海量的电力系统运行数据。基于 MCMC 的抽样结果可以使电力系统特征在取值范围内分布更加均匀,增加样本的代表性,有助于提高 1DCNN 模型的泛化性能。

根据以往经验,对系统模型设置短路类型、故障位置以及故障切除时间,并执行时域仿真计算,得到对应的发电机最大功角差。最大功角差超出 180° 即视为失稳,否则认为系统稳定。若故障数量为 N ,则单个电力系统运行数据包括 N 个最大功角差,分别对应不同的故障^[13]。

2 基于 1DCNN 的暂态稳定评估

2.1 一维卷积神经网络

CNN 是一种前馈神经网络,它的人工神经元可以对一定覆盖范围内的输入特征进行响应,在大型图像处理中性能突出。CNN 由一个或多个卷积层、

线性整流层、池化层和顶端的全连通层组成。1DCNN 是 CNN 的一维形式,被普遍应用于序列数据识别中,更适合电力系统状态特征向量的识别,相比于传统神经网络方法,具有更高的拟合准确度和更好的泛化性能等优点^[14-16]。

1)输入层

CNN 的输入层用于接收输入数据,其中 1DCNN 的输入层的输入参数为一维数据,在这里为发电机有功出力、发电机节点电压、有功负荷和无功负荷组成的向量。

2)卷积层

卷积层的功能是对输入数据进行特征提取,内部包含多个卷积核,并且含有权重和偏置需要进行训练更新。卷积核比输入参数维度小,对于 1DCNN,卷积核也为一维,并且会在输入参数上进行滑动,对其范围内参数进行特征提取和映射,并且需要设置每次滑动步长。

3)激活函数

对卷积层得到的特征进行非线性化处理,增加模型的拟合能力,常用的激活函数有 ReLU、Sigmoid 等。

$$\text{ReLU} = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

式中, x 为激活函数的输入。

所选用的激活函数为 ReLU 函数,如图 1 所示。

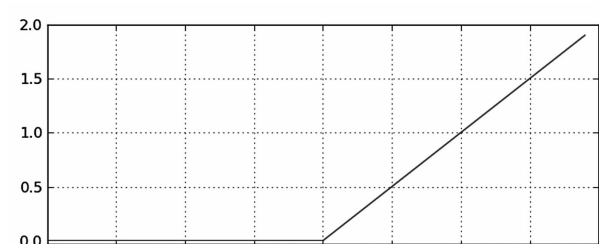


图 1 ReLU 函数

4)池化层

池化层的作用是对数据进行降维,它会设定池化区域,在该区域内进行降维,常用的池化操作有:

(1)最大值池化:在池化区域内取最大值作为最终的特征。

(2)平均值池化:在池化区域内取均值作为最终的特征。

设滑动步长为 2,卷积核长度为 4,对长度为 9 的向量卷积结果如图 2 所示。

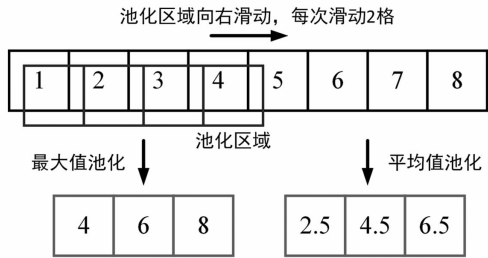


图 2 最大值池化和平均值池化

5)全连接层

CNN 中的全连接层等价于传统前馈神经网络中的隐含层,包括前向传播和反向传播两部分。

前向传播中,数据从输入到输出,第 l 层的输出为

$$a_l = \sigma(z_l) = \sigma(W_l a_{l-1} + b_l) \quad (6)$$

式中: σ 为激活函数; W_l 为权重, b_l 为偏置; z_l 为未激活前输出; a_l 为输出。

反向传播由输出向输入传播,并逐层更新权重和偏置,更新的依据为 1DCNN 的正向输出结果和时域仿真计算结果的偏差,偏差的表达式为

$$J(W, b, x, y) = \frac{1}{2} \| a_l - y \|_2^2 \quad (7)$$

式中: x 为样本输入; y 为样本真值; J 为偏差。

J 对 W 和 b 求梯度为:

$$\frac{\partial J(W, b, x, y)}{\partial W_l} = \frac{\partial J(W, b, x, y)}{\partial z_l} \frac{\partial z_l}{\partial W_l} \quad (8)$$

$$\frac{\partial J(W, b, x, y)}{\partial b_l} = \frac{\partial J(W, b, x, y)}{\partial z_l} \frac{\partial z_l}{\partial b_l} \quad (9)$$

得到梯度后,使用随机梯度下降法更新 W 和 b ,减小偏差。

6)输出层

输出层为 CNN 的最终输出结果,1DCNN 的最终输出结果为所有故障的最大功角差。

除此之外,在训练 1DCNN 的过程中使用了 L2 正则化仿真过拟合:

$$J(W, b) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m \| a_i - y \|_2^2 + \frac{\lambda}{2m} \sum_{j=1}^l \| w \|_2^2 \quad (10)$$

式中, λ 为 L2 正则化的超参数。

1DCNN 在 Tensorflow 框架上进行搭建,搭建好的 1DCNN 的模型如图 3 所示。

2.2 基于 1DCNN 的暂态稳定评估

1 DCNN 模型搭建好之后,将 MCMC 产生的运

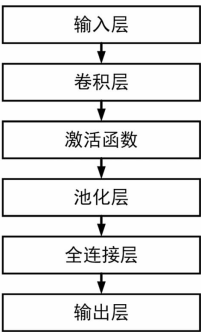


图 3 1DCNN 结果

行场景(发电机有功出力、发电机节点电压、有功负荷和无功负荷)作为 1DCNN 的输入参数,将所有故障的最大功角差作为输出参数,并对 1DCNN 进行训练,所提 1DCNN 结构如图 4 所示。

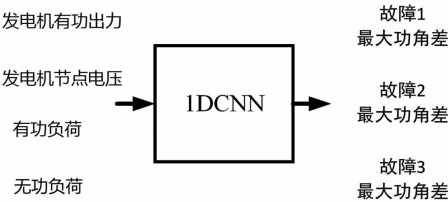


图 4 1DCNN 结构

以发电机最大功角差是否超过 180° 作为判断系统是否失稳的标准,并且只要有一个故障下的最大功角差超过 180° ,即认为系统失稳。因此准确度定义为 1DCNN 模型成功判断系统稳定性的百分比。

3 算例分析

3.1 测试系统

选取新英格兰 10 机 39 节点系统进行算例测试,该系统包括 39 个节点、10 台火力发电机、34 条输电线路、12 台两绕组变压器和 19 个负荷,该系统的示意图如图 5 所示^[17]。

3.2 电力系统运行数据仿真

设置发电机有功出力在基础出力的 80% ~ 120%、发电机节点电压的标幺值在 0.95 ~ 1.1、有功负荷和无功负荷均在 80% ~ 120% 之间波动。通过 MCMC 算法抽样 5000 个样本,作为电力系统运行场景。

设置 39 节点系统的故障类型为输电线路三相短路故障,故障位置为线路中心,故障数量为 15 条输电线路,故障持续时间为 0.5 s,在电力系统工具箱 PST 中进行时域仿真计算,得到不同故障下发电机的最大功角差,将其与对应的运行场景结合,作为

训练 1DCNN 的样本数据。

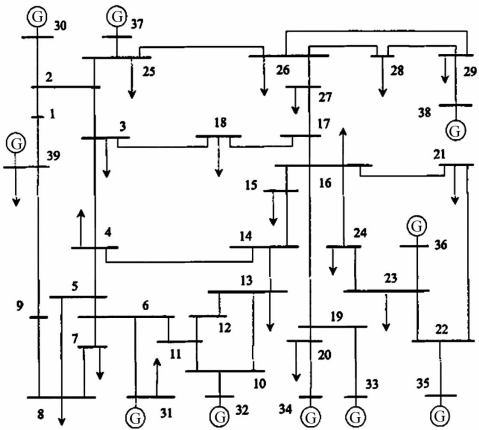


图 5 新英格兰 10 机 39 节点系统

3.3 基于 1DCNN 的暂态稳定评估结果

样本数据生成后,对 1DCNN 模型进行训练,将 MCMC 产生的运行场景(发电机有功出力、发电机节点电压、有功负荷和无功负荷)作为 1DCNN 的输入参数,输入参数的维度为 58;将所有故障的最大功角差作为输出参数,输出参数的维度为 15。设置输入层、卷积层、激活函数、池化层、全连接层和输出层数量各为 1,共 6 层。设置每批次训练样本数量为 500,训练次数为 100,训练集数量为 4000,测试集数量为 1000,对 1DCNN 进行训练,其在训练过程中的误差曲线如图 6 所示。

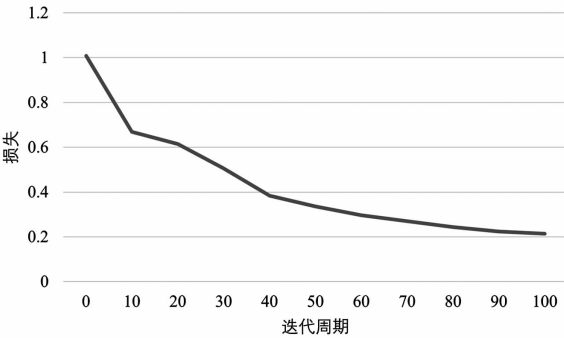


图 6 训练集损失曲线

从图 6 可以看出,随着训练迭代次数增加,损失逐渐降低,表明 1DCNN 实现了基于运行场景的暂态稳定拟合。

1DCNN 的准确率如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着迭代周期的增加,1DCNN 的准确度持续增加,并且在末端保持在 90% 以上的准确度,表明所提算法实现了暂态稳定的准确评估。

训练好 1DCNN 模型后,可进行在线的暂态稳定评估,与传统基于时域仿真的暂态稳定评估相比,在评估速度上得到极大提升,评估时间对比如表 1 所示。

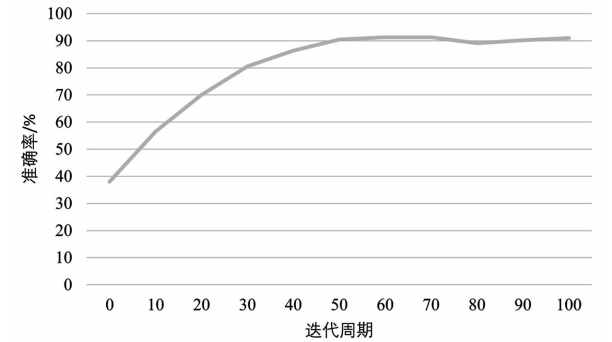


图 7 训练集准确率曲线

表 1 算法评估时间对比 单位:s

方法	单次故障时间	所有故障时间
基于时域仿真的暂态稳定评估	35	525
基于 1DCNN 的暂态稳定评估	0.1	0.1

从表 2 可以看出基于 1DCNN 的暂态稳定评估算法在计算时间上相较于传统时域仿真方法有极大提升,并且可以同时得到所有故障的暂态稳定评估结果,故障数量越多,算法在评估时间上的优势越明显。

最后,对比所提方法与其他文献方法的评估准确度,结果如表 2 所示。

表 2 评估准确度对比

模型	模型识别准确度/%
1DCNN	91.2
DBN	91.0
SVM	85.7
BP	88.9

从表 2 可以看出所提方法在准确度上明显优于其他方法,可以实现更加精准的电力系统暂态稳定评估。

4 结 语

上面提出了一种基于 1DCNN 的电力系统暂态稳定在线评估算法。该算法将 1DCNN 引入电力系统暂态稳定评估和安全风险辨识中,通过 MCMC 算法生成算例模型海量可能的运行场景,并通过时域仿真计算暂态稳定指标,通过 1DCNN 实现暂态稳定性能快速评估。并在新英格兰 10 机 39 节点系统中进行了算例验证,算例结果表明了所提算法的可行性和先进性。通过算例分析,得到如下结论:

1)利用马尔科夫链和蒙特卡洛抽样算法结合的 MCMC 算法对电力系统运行场景进行抽样,所生成样本可以很好反映系统运行特征,提高 1DCNN

的泛化性能;
2)将 1DCNN 引入电力系统暂态稳定评估中,将系统运行场景作为输入参数,将所有故障的最大功角差作为输出,对 1DCNN 进行训练,实现了基于 1DCNN 的电力系统暂态稳定快速评估,并且从算例结果可以看出所提算法评估时间满足在线应用的需求。

参考文献

[1] 刘念,谢驰,滕福生. 电力系统安全稳定问题研究[J]. 四川电力技术,2004,27(1):1-6.

[2] 周士琼,王倩,吕潇,等. 含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 四川电力技术,2016,39(5):9-13.

[3] 刘挺坚,苟竞,胥威汀,等. 基于支路能量时空特征的电力系统暂态稳定性分析[J]. 四川电力技术,2017,40(1):9-13.

[4] 陈振,韩晓言,范成围,等. 融合智能代理模型和改进微分进化算法的电力系统暂态稳定预防控制[J]. 四川电力技术,2019,42(4):1-6.

[5] 戴远航,陈磊,张玮灵,等. 基于多支持向量机综合的电力系统暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1173-1180.

[6] 陈明华,刘群英,张家枢,等. 基于 XGBoost 的电力系统暂态稳定预测方法[J]. 电网技术,2020,44(3):1026-1034.

[7] 姚德全,贾宏杰,赵帅. 基于复合神经网络的电力系统暂态稳定评估和裕度预测[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):41-46.

[8] 苏童,刘友波,沈晓东,等. 深度学习驱动的电力系统暂态稳定预防控制进化算法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3813-3824.

[9] 朱乔木,陈金富,李弘毅,等. 基于堆叠自动编码器的电力系统暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2937-2946.

[10] 朱晨曦,张焰,严正,等. 采用改进马尔科夫链蒙特卡洛法的风电功率序列建模[J]. 电工技术学报,2020,35(3):577-589.

[11] Christophe Andrieu, Nando De Freitas, Arnaud Doucet, et al. An Introduction to MCMC for Machine Learning[J]. Machine Learning, 2003, 50(1-2):5-43.

[12] 朱晓荣,王羽凝,金绘民,等. 基于马尔科夫链蒙特卡洛方法的光伏电站可靠性评估[J]. 高电压技术,2017,43(3):1034-1042.

[13] 朱乔木,党杰,陈金富,等. 基于深度置信网络的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):735-743.

调控终端安全管控技术研究与应用

王先强,张 睿,张 华

(国网四川省电力公司南充供电公司,四川 南充 637000)

摘 要:在能源互联网和电网智能化的发展趋势下,各类新型电网业务和工作场景访问调度主站系统的需求增多,需要规范调度终端的权限配置,加强操作过程安全审计,完善管理制度和技术手段,有效防范安全攻击,提升应对极端情况的风险防控水平。通过对现有调度终端键盘、显示器、鼠标延伸技术的使用现状分析,提出了一种基于云计算和生物多因子认证的调控终端安全管控技术。该技术根据电网调度自动化的业务场景,融合计算虚拟化、网络虚拟化、存储虚拟化、运维监控管理、云桌面业务流程交付等软件技术,形成标准化的调控终端安全管控系统解决方案。

关键词:调度终端; 调控终端安全管控; 云计算; 生物多因子认证

中图分类号:TV 171 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0043-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210409

Research and Application of Security Control Technology for Dispatching Control Terminal

Wang Xianqiang, Zhang Rui, Zhang Hua

(State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract:Under the intelligent development of energy Internet and power grids, various new power grid services and work scenarios have a increased demand for the access to dispatching master station system. It is necessary to standardize the authority configuration of dispatching terminals, strengthen the safety audit of operation process, improve the management system and technical means, which can effectively prevent security attacks and improve risk prevention level in response to extreme situations. By analyzing the current status of the use of KVM(keyboard, video, mouse) extension technology for dispatching terminals, a regulatory terminal security control technology based on cloud computing and biological multi-factor authentication is proposed. According to the business scenarios of power grid dispatching automation, the proposed technology integrates software technologies such as computing virtualization, network virtualization, storage virtualization, operation and maintenance monitoring and management, and cloud desktop business process delivery to form a standardized regulatory terminal security management and control system solution.

Key words:dispatching control terminal; security control technology for control terminal; cloud computing; biological multi-factor authentication

0 引 言

随着电网业务模式的逐步改革,除传统的县/区调度外,现货交易、检修公司、集控站运维班等调度以外的单位也有着连接访问调度主站系统,并对与之业务相关的电网运行数据、厂站设备信息等进行运行监控和信息查询的需求。

国家电网有限公司在 2020 年提出建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业的宏伟目标,各项工作正在加紧步伐开展建设,各类新型电网业务和工作场景中访问调度主站系统的需求将会更多。

在目前国家电网有限公司“调控一体化”的运行管理模式下,县/区调及检修公司等基层调度单位已无独立的调度主站系统,完全依赖地市调度端主站系统,在此应用背景下调控人机工作站终端成为

了基层调度单位工作人员访问主站系统的唯一工具,其重要性不言而喻。

目前各级调度单位所使用的调控人机终端,仍为传统物理图形工作站,以国网四川省电力公司南充供电公司(以下简称南充公司)为例,调度员工作站 30 台,监控工作站 30 台,运维工作站 18 台,培训模拟工作站 6 台,未来延伸至检修公司及各变电站运维检修工作站需 30 台,共计 114 台。

目前,影响调度人机工作站稳定安全运行和无法实现集中统一管控的主要因素有以下 4 个方面。

1)县供电公司、变电站端与市级调度自动化主站系统之间的调度数据网带宽有限,县供电公司、变电站端工作站与调度自动化主站系统之间发生模型、图形下载、数据更新等批量操作和大数据量更新时,会阻塞站端与主站系统的网络通道,使工作站无法正常操作,影响站端实时数据上传。远端调度终端与主站系统的数据通讯流量峰值超过 50 MB,远端查询调度自动化主站系统中历史数据时,从提交查询到出现查询结果超过 2 min。

2)现货交易大厅、集控站、第三应急调度大厅等需进行工作站延伸的办公场所,在网络安全防护技术手段、基础设施和运行环境上相较调度中心仍待完善,尚无法达到调度系统安全 I 区的系统运行安全要求,易导致通过非工作站设备的违规接入调度生产大区网络和 workstation 上的重要数据外露。

3)人机工作站的管理和维护完全依赖地市级调度中心,以四川南充地调与所属阆中县供电公司为例,两地相距近 90 km,人机工作站被广泛应用在各区县供电公司、现货交易大厅、集控站、第三应急调度大厅等地后,造成工作站出现故障后无法及时响应且维护成本高、周期长。

4)为满足网络安全要求,需定期对工作站操作系统、应用客户端进行安全漏洞检查、补丁加固、程序版本升级等工作,手工进行此类频繁且琐碎的工作容易出现纰漏,并需占用大量的人力资源。

下面研究了应用于调控人机交互终端安全管控领域的关键技术,提出基于能源互联网的调控终端集中管控系统整体框架,重点研究了调控终端集中管控软件的架构及功能,并在南充公司地、县两级调度中心进行了示范应用,为后期调控终端运行工况及调控人机交互终端安全管控领域的发展提供实时数据。

1 调控终端安全管控技术现状

国家电网有限公司各级调控中心本部或是延伸至县、区供电公司及检修公司、运维班、集控站等地所使用的调控终端主要采用物理工作站结合键盘、显示器、鼠标(keyboard video mouse, KVM)延长器的技术形式进行安全管控。

1)该技术形式需要为每位调度员及相关运维人员均分配 1 台独立的图形工站,每台工作站的硬件操作系统、应用、补丁均需逐个在现场进行安装、维护和调试。

2)工作站集中部署在调度机房中,工作站 1 台占用 2U 机柜位置,大量工作站会占据大量机房空间。

3)使用 KVM 延长器进行显示画面延伸,实现人员和设备之间进行简单的物理距离、空间隔离。但使用时网络带宽占用高,无法满足目前国家电网公司变电站通道多为 2 M 的窄带宽通讯现状,且通讯链路无加密等安全防护手段。

4)调度台及各办公工位无工作站主机,通过 KVM 延长器连接相应人机交互外设。主站系统操作确权所需的安全 ukey 识别率较低影响工作效率。USB 外部设备可随意接入使用,存在数据漏风险。延长器无生物因子安全认证功能,账号密码易泄漏。

5)操作人员使用 KVM 延长器操作工作站时,对调度控制主站系统的操作过程无法进行审计和记录,无不合规操作进行责任追溯和源头分析能力,无法实现危险指令的阻截。

2 基于云计算和生物多因子认证的调控终端安全管控技术

针对目前调度终端工作站分布广、数量多、维护困难且成本高,新应用安装部署繁琐、周期长,外设无法有效管控,违规操作无法追踪,安全事故无法回溯等问题,将计算虚拟化、网络虚拟化、存储虚拟化、融合运维监控管理、云业务流程交付等软件技术应用于调控终端安全管控,形成基于云计算技术的终端操作系统桌面交付与“云桌面”管理解决方案,并可以根据电网调度自动化的业务场景,定制标准化的调度人机交互终端系统模板。利用调度数据专网聚合多套 X86 设备,实现资源模块化的横向弹性伸

缩,形成统一的计算与存储资源池。

2.1 调控应用集中管控技术

针对人机工作站被广泛应用在各区县供电公司、现货交易大厅、集控站、第三应急调度大厅等不同地理区域的问题,采用云桌面技术将所有工作站都集中虚拟化到终端管控系统上,可集中管理不同场所中的所有调度人机终端。

1)在安全加固、补丁升级等操作过程中,相较传统物理工作站,无需逐台进行安全加固和补丁升级,可通过管理策略统一下发功能,集中对所有虚拟工作站进行安全策略和补丁的分发,进而快速便捷地完成所有虚拟工作站的安全加固和补丁升级,可靠性高,减少了人工加固、升级时误操作可能性,极大缩减了人力投入。

2)通过终端管控系统的虚拟工作站克隆复制功能,可在短时间完成工作站的批量安装和部署。工作站系统出现故障时也可通过此功能进行快速恢复,有效地节约自动化人员的时间和维护工作量。

2.2 瘦终端安全防护技术

针对传统图形工作站维护成本高、故障修复周期长问题,将基于云计算的瘦安全终端作为调控终端。该设备使用免维护式设计,设备中内嵌了独立的嵌入式、精简化的国产安全操作系统基础内核,仅保留了网络通讯、屏幕操作等基本功能,即插即用,不存在其他的繁琐配置过程。瘦安全终端是提供给调度员和运维人员使用的前端基本操作设备,通过此设备连接访问地调侧的虚拟调度工作站桌面。

瘦安全终端采用人脸识别和指纹识别的生物多因子认证技术进行登录。终端加电启动时,使用图像识别人脸检测算法完成人脸检测功能,人脸识别库完成人脸特征提取的功能,完成人脸特征识别检测。瘦安全终端配套的指纹识别鼠标,将射频传感器内嵌在鼠标装置内,通过传感器发射微量的射频信号,可以穿透手指的表皮层获取里层的纹路以获取信息。相对于传统光学识别等传统指纹技术,射频传感器对手指的干净程度要求较低,具有更高的识别率和准确度。生物多因子特征识别检测认证成功后方可对瘦安全终端进行操作,可有效避免非授权人员通过终端进行违规操作。

2.3 图形压缩编码安全传输技术

基于目前地调与站端通讯时,调度数据网带宽较窄($\leq 2\text{ MB}$)的特点,研究并验证通过新一代虚拟

桌面传输协议,通过采用基于图形库的软件处理方式,使用 CPU 计算资源,提供 2D 图形数据的渲染处理能力。同时也提供了基于 GPU 的硬件处理方法。通过分类压缩技术提供 3 种无损图像压缩算法,分别是 Quic、LZ 和 Glz 压缩算法。优化视频数据传输方式,直接把视频数据以流媒体的方式发送到终端设备,避免解码操作,图像渲染性能优化通过图形区域的刷新频率来侦测视频区域,采用 MJPEG 压缩算法。

通过该协议可以实现瘦安全终端远程访问虚拟调度工作站桌面,并具有文字与图像显示更清晰细腻、视频播放更清晰流畅、声音音质更真实饱满、兼容性更好、带宽低等特点。

2.4 基于国密的可信接入和通信加密技术

通过基于国密算法的可信接入和通道加密技术,再结合在各网络边界国家电网专用纵向加密装置,实现调度人机终端在不同工作场所通过人机交互网或调度数据网与主站系统之间的信息通讯安全可控,且无需对生产控制大区的网络安全架构进行调整。

基于国密的可信接入和通信加密技术隔离了终端与调控主站系统之间的直接通讯。基于国密算法的加解密技术以识别、匹配、认证和授权接入的终端,彻底杜绝使用笔记本等设备的违规、非法接入调度专网。

2.5 多屏幕扩展跨屏操作时的实时安全审计

通过深入研究多屏操作实时安全审计功能,实现人机安全终端开机即可以自动开启运维审计模式,前端操作人员无感知,不需经浏览器等第三方工具跳转,图形化操作等使用习惯和之前一致。对所有图形和字符操作进行审计,支持双屏、四屏扩展显示操作时实时录屏审计,并可对操作指令及输出结果进行搜索、定位和查询,实现对危险指令的阻截。根据工作需要,对 USB 外设进行管控,选择是否启用相应的 USB 外设。对于 U 盘等存储设备还可记录数据的上传和下载记录。

进一步加强对维护人员的安全监管,扩大行为审计范围,加强事前授权与事后行为记录的合规性审计能力和评估各类角色人员的专业度能力,全面提升规范化管理水平。

3 调控终端安全管控系统架构

根据电网调度自动化的业务场景,融合计算虚

拟化、网络虚拟化、存储虚拟化、运维监控管理、云桌面业务流程交付等软件技术,形成标准化的调控终端安全管控系统架构。实现调控终端从物理工作站转换为虚拟化工作站,并对其进行集中安全管控。一台虚拟工作站对应传统的一台物理调度工作站。

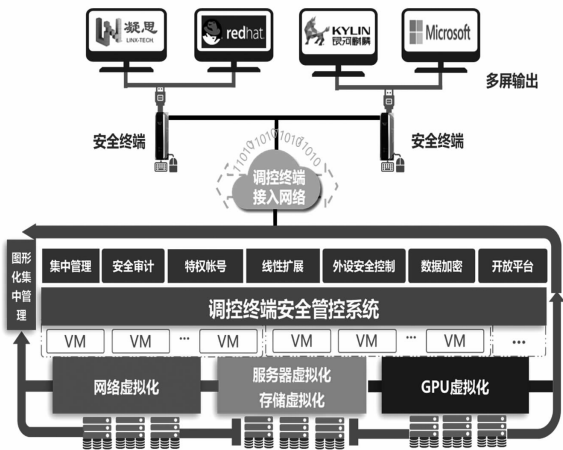


图 1 调控终端安全管控系统架构

调度主站系统相关数据、应用均运行在虚拟工作站上。统一部署在调控终端安全管控系统上由省、地市统一管控,调度台、变电运维班、现货交易大厅等办公场景,仅需通过精简的安全终端(瘦客户机)设备,复用现有电力专网通道,连接至地调侧的终端管控系统,终端管控系统对申请接入的调控安全终端进行识别和安全认证,接入成功后将虚拟工作站的操作界面传递给安全终端,调度员即可按传统物理工作站的使用习惯进行日常的监控和调度操作。安全终端与终端管控系统之间通讯带宽要求较低,具有与后端调度自动化主站系统之间数据交互简单的技术特性。

4 调控终端安全管控系统应用方式

4.1 整体应用架构

遵循国家电网有限公司要求的“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”^[1-3]的电力调度数据网络安全规范,在生产控制内部署;终端管控系统通过安全区内核心交换机接入安全Ⅰ区和Ⅱ区,平台内虚拟工作站按使用需求可同时配置Ⅰ区和Ⅱ区 IP 地址,在防火墙上配置访问策略,并安装相应调度主站系统客户端程序后通过调度主站系统配置连接相应的主站系统。

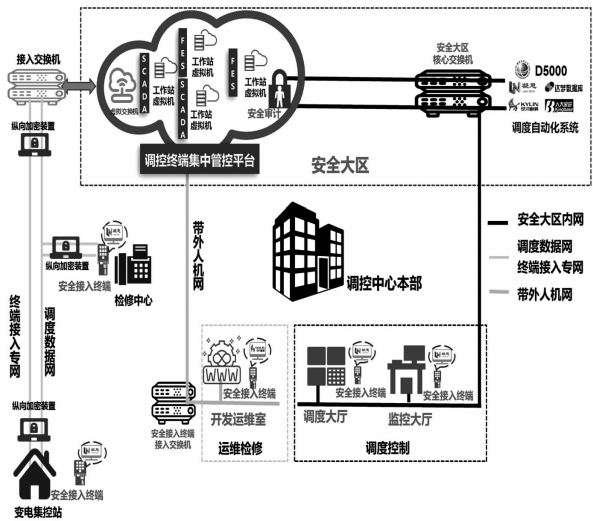


图 2 整体应用架构

4.1.1 网络接入

- 1)终端管控系统通过多网口冗余绑定方式扩展数据交互带宽。
- 2)终端管控系统通过虚拟交换机的方式接入生产控制大区内的核心交换机。

4.1.2 数据交互

- 1)虚拟工作站通过终端管控系统虚拟交换机与安全分区内的调度自动化系统主站系统进行数据交互。
- 2)虚拟工作站与调度自动化系统主站系统的业务、数据交互模式,维持与物理工作站方式一致。
- 3)无需对调度自动化系统主站系统进行改造,不影响调度自动化系统主站系统的正常运行。

4.2 全分布式的存储技术应用

研究新一代的基于 X86 架构的分布式存储技术应用技术,采用基于业界标准的 X86 服务器,彻底抛弃了很多系统仍在使用的存在性能和可靠性问题的集中化元数据处理节点架构,借鉴业界最先进的全分布式、无共享(share nothing)架构设计理念,采用基于策略的分布式哈希表数据路由算法,使得客户端无需查找元数据节点,通过计算就能直接寻址到数据所在的存储节点,大大缩短了数据 IO 访问路径,提升了系统性能。

同时,整个系统也无集中管理和控制节点,每一个数据节点都有能力承担另一数据节点的功能,节点之间通过内部高效的分布式协议完成相互协作和通信。这种去中心化、无状态的全分布式数据处理架构是系统能实现水平、线性扩展能力的关键,有力地保证了整个系统无单点故障,无性能瓶颈。

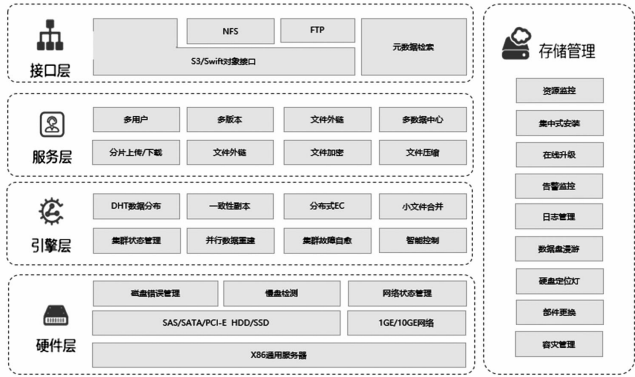


图 3 全分布式存储

4.3 GPU 虚拟化技术应用

计算机图形处理器 (graphic processing unit, GPU),1999 年由 NVIDIA 公司提出。GPU 虚拟化即将 GPU 进行切片,并将这些 GPU 时间片分配给虚拟机使用的过程。

调控终端集中终端管控系统的桌面虚拟化解决方案中,基于 NVIDIA 公司提供的 GPU 虚拟化技术,即 vCUDA(virtual CUDA)技术,采用在用户层拦截和重定向 CUDA API 的方法,在虚拟机中建立物理 GPU 的逻辑映像——虚拟 GPU,实现 GPU 资源的细粒度划分、重组和再利用,支持多机并发、挂起恢复等虚拟机高级特性^[4]。

其 vCUDA 的实现原理大概包括 3 个模块:CU-DA 客户端、CUDA 服务端和 CUDA 管理端。

调控终端集中终端管控系统基础服务器,能够直接控制硬件,系统内安装着原生的 CUDA 库以及 GPU 驱动,使得 Host OS 可以直接访问 GPU 和使用 CUDA。其他的虚拟机属于非特权虚拟机 (guest VM),其上运行的操作系统 (guest OS) 不能直接操纵 GPU。CUDA 客户端称之为客户端驱动,CUDA 服务端称之为宿主机的驱动,CUDA 管理端称之为 GPU 管理器^[5-7]。

在调控人机交互终端领域由于调度终端工作站必须采用国产安全操作系统,针对国产操作系统 (麒麟、凝思等) 在云桌面使用场景中对图形显示和图形运算进行优化,以满足在电力调度控制应用场

景下对图形显示和图形运算的高标准、高性能需求。国产安全操作系统在生产销售之前需要通过公安部计算机信息系统安全产品质量监督检验中心的检测,基本功能需符合 GB/T 20272—2006《信息安全技术操作系统安全技术要求》第四级结构化保护

级的安全功能的相关要求,因此其内核驱动接口已被重新封装和改造,研究根据国产操作系统的内核驱动接口开发安全规范,根据内核中 platform. c 提供的平台总线 (platform_bus) 以及注册平台设备 (platform_device) 和平台驱动 (platform_driver) 的相关接口,对平台设备 (platform_device) 和平台驱动 (platform_driver) 进行编码,重新开发 vGPU 设备驱动,并使其可在国产安全操作系统中得以应用。

5 实验数据

为了验证调控终端安全管控系统效果,在南充公司智能电网调度控制系统场景下进行实验。运用所提的基于云计算和生物多因子认证的调控终端安全管控技术,构建调控终端安全管控系统典型应用架构,如图 4 所示。

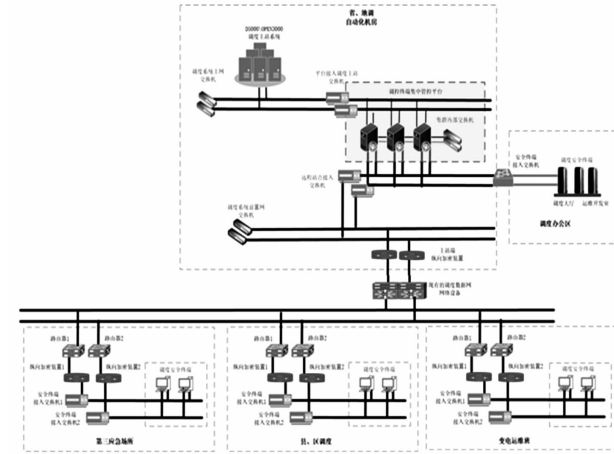


图 4 调控终端安全管控系统典型应用架构
系统关键指标参数如下:

1)实现基于凝思、麒麟等多个版本国产安全操作系统的 GPU 虚拟化功能,支持双屏和四屏显示。一块 Nvidia M10 32 G 显存 GPU,虚拟化后可分配给 64 台虚拟工作站同时使用。

2)一台双路 CPU、128 G 内存配置的通用 X86 服务器支持同时运行 32 台调度虚拟工作站。

3)在阆中(距南充地调 80 km)县供电公司,30 MB 网络带宽条件下访问调度主站系统并进行数据查询、曲线调阅等日常调度操作时,传统物理工作站模式与瘦安全终端模式的对比数据如表 1 所示。

表 1 实验耗时对比		单位:s
测试项	物理工作站	瘦安全终端
查询历史数据	54.80	2.27
打开电网图形	31.53	3.13
打开曲线图	28.81	3.26
警告查询	34.60	2.13
今日越限查看	20.44	1.44

4)在阆中县供电公司,分别进行 2 M、4 M、6 M、8 M、10 M 带宽限制,通过县调安全终端访问和操作调度主站系统。显示画面分辨率设置为 3840 × 1080 的双屏显示。

(1)2 M 带宽限制的情况下进行日常操作及维护,告警声音、告警弹窗、告警信息、报表生成、潮流图、接线图等功能正常可用,画面拖动有轻微拖影操作稍有卡顿。

(2)4 M 和 6 M 带宽限制的情况下终端可正常操作使用应用,操作频繁时稍有卡顿,无延迟,告警声音、告警弹窗、告警信息、报表生成、潮流图、接线图等功能正常可用。画面拖动以及操作使用应用正常流畅,画面拖动无拖影。

(3)8 M 和 10 M 以上系统画面流畅,清晰度高,无延迟,无卡顿,告警声音、告警弹窗、告警信息、报表生成、潮流图、接线图等功能正常可用。

5)瘦安全终端开机自启动实时操作安全审计,平均一小时审计视屏占用 60 MB 磁盘空间,审计视频调阅无延迟,可搜索定位。

表 2 方案对比		
功能项	物理工作站	调控终端安全管控系统
多屏显示	仅限双屏	支持双屏、四屏及以上
USB 等外设安全管控	不支持	支持,可对终端上任意外设接口进行安全管控和行为审计
操作行为审计	不支持	支持,可对终端屏幕图形化、字符界面命令行操作录像、并记录鼠标及键盘的每一个动作,可按关键字、时间段等多条件进行检索和展示
带宽、Ukey 支持	调度终端延伸带宽 ≥30 MB KVM 调控中心本部, <1 km D5000 数字证书 Ukey 识别率低 <70%	任意距离支持窄带宽 ≥2 M,数据实时刷新、图形和模型加载快、多屏操作流畅 D5000 数字证书 Ukey 识别率 >98%
调度主站系统数据加载	县供对历史库数据查询时耗时超过 2 min 数据更新下发时远程工作站通道阻塞,无法操作	县供电公司历史库数据查询时耗时约 30 s 虚拟工作站与主站系统同处控制大区,数据更新不影响前端正常操作
数据传输安全	不支持	管控平台与终端之间证书认证和通道国密算法加密,可结合网络边界纵向加密装置多重网络安全保护
工作站集中运维	成本高,专业要求高	地调平台集中创建、维护和管理工作站,无需进站维护
投入资源	图形工作站、KVM 矩阵、运维审计系统、代理服务器、代理软件	调控终端集中管控平台、基础服务器和精简安全终端
主站系统结构影响	较大,需新增代理服务器和代理软件并改造人机软件	无需对 D5000 进行改造
机房空间	114 台工作站,占用 15 个机柜	大量节省机房空间,2 个机柜

6 方案对比

从规范权限配置,加强操作过程安全审计,完善管理制度和技术手段,防范安全攻击,应对极端风险防控,加密网络传输,完善对延伸至外部的远程接入安全终端设备进行集中、统一的安全管控和运维管理等多个维度,综合对比传统物理工作站与调控终端安全管控系统两种技术方案,对比数据如表 2 所示。

7 示范应用

南充公司于 2019 年 12 月开始本系统的试点建设部署和应用,通过多轮的技术交流、现场收资、方案制定,最终完成调控终端集中终端管控系统在智能电网调度控制系统“地县一体化”模式下和基于国产安全操作系统 GPU 虚拟化、生物多因子特征安全认证等关键技术的适应性定制。经过测试验证,于 2020 年 1 月正式投入上线试运行,目前使用场景包括部分地调调度席位、地调自动化值班席位、四川电网备调中心运维席位以及阆中县等 6 个分公司。该系统示范应用拓朴如图 5 所示。

在调度坐席、值班席位和运维席位等不同应用场景的实际使用过程中,调度员、运维开发人员通过在

桌面放置的小型化、精简的安全终端设备经网络接入终端管控系统,获取相应的虚拟机资源和交互画面并对其进行操作,使用体验与使用物理工作站无差别。

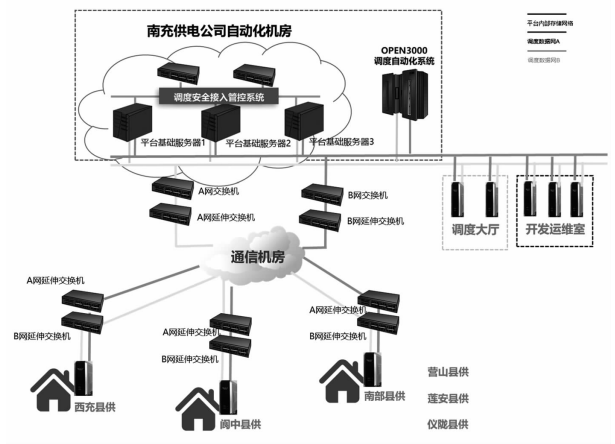


图 5 示范应用拓扑

特别是在西充(距地调 40 km)和阆中(距地调 80 km)两个县供电公司远程部署的场景下,终端管控系统优化了自身传输协议,对于网络带宽的需求降至 10 M 以下,满足窄带宽工作要求,相较传统物理工作站 30 M 以上的带宽需求,明显降低了对于网络带宽的消耗。同时对于所穿透的纵向加密设备,也减轻了其加密负载。数据实时刷新、场站图形和模型加载、历史库数据查询速度较传统工作站提升 60% 以上。

8 结 语

所提出的调控终端安全管控系统极大提高了日常对工作站的管理和维护效率,结合终端管控系统

(上接第 19 页)

[12] 卜云,高传海,李文芳,等. 大数据架构下电力系统风险评估[J]. 电网与清洁能源,2021,37(1):77-83.

[13] 田园,原野. 基于改进 K-means 算法的电力大数据系统研究[J]. 电子设计工程,2021,29(2):76-80.

作者简介:

靳文星(1996),男,在读硕士,研究方向为电力信息

的安全审计、认证管理、授权管理等运维安全管理功能,可对调控终端进行统一管理和集中调配,实现了对调度员和维护人员使用调控终端的安全审计、风险防范,加强了调度工作站使用的机密性和规范性,满足等保要求。

项目试运行以后运行良好、稳定、可靠,达到了项目预期效果,可以推广应用。

参考文献

[1] 殷自力,钱静,陈宇星,等. 基于 D5000 平台的调配一体技术方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(18):162-167.

[2] 李敏子. 电力调度自动化中的一体化技术[J]. 电子技术与软件工程,2018(10):123-123.

[3] 邱丽娜. 电力调度自动化系统中一体化技术的应用[J]. 现代信息科技,2017,1(6):28-29.

[4] 余时强,张为华. GPU 虚拟化相关技术研究综述[J]. 计算机系统应用,2017,26(12):25-31.

[5] 仝伯兵,杨昕吉,谢振平,等. GPU 虚拟化技术及应用研究[J]. 软件导刊,2015,14(6):153-156.

[6] 陈钢,吴百锋. 面向 OpenCL 模型的 GPU 性能优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011(4):571-581.

[7] 卢风顺,宋君强,银福康,等. CPU/GPU 协同并行计算研究综述[J]. 计算机科学,2011,38(3):5-9.

作者简介:

王先强(1979),男,高级工程师,从事电网及二次系统管理工作;

张 睿(1982),男,硕士,高级工程师,从事电网及二次系统管理工作;

张 华(1985),男,硕士,高级工程师,从事调度自动化管理工作。

(收稿日期:2020-01-17)

及自动化;

王电钢(1973),男,教授级高级工程师,研究方向为电力信息化;

张哲敏(1997),男,在读硕士,研究方向为电力信息化及自动化。

(收稿日期:2021-03-01)

换流站导体载流量计算方法比较与研究

韩毅博,马 亮,王 刚

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘 要:导体载流量计算是直流换流站设计的重要组成部分,目前国内尚无规程规范规定直流换流站导体载流量的计算方法。鉴于直流换流站导体承受的电流应力较为复杂,根据载流量计算的基本原理给出了换流站中不同载流工况下导体载流量计算的基本原则,确定了适用于换流站导体载流量计算的修正的热平衡方程。在载流量计算方法方面,综合分析比较了《电气一次设计手册》、DL/T 5222—2005、IEEE 738-2012、IEEE 605-2008、IEC 61597-1995 等 5 个规程规范给出的交流导体载流量计算方法及其计算结果,重点对比了不同的对流散热功率计算方法。建议采用修正的《电气一次设计手册》计算方法计算换流站户外导体载流量;可根据不同导体外径分别采用 IEEE 738-2012 推荐方法和 DL/T 5222—2005 实际采用的方法计算换流站户内导体载流量。

关键词:换流站;导体载流量;自然对流散热;强迫对流散热

中图分类号:TU 997 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954 (2021) 04 - 0050 - 07

DOI:10. 16527/j. issn. 1003 - 6954. 20210410

Comparison and Research on Ampacity Calculation Methods of Conductor in Converter Station

Han Yibo, Ma Liang, Wang Gang

(CPECG Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.,
Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract:The calculation of conductor ampacity is an important part of the design of DC converter station. At present, there is no code for calculating the conductor ampacity of DC converter station. In view of the complexity of current stress on the conductor of DC converter station, the basic principle of conductor ampacity calculation under different current-carrying conditions in converter stations is given according to the basic principles of current-carrying capacity calculation, and the modified heat balance equation suitable for the conductor ampacity calculation in converter station is determined. In terms of current-carrying capacity calculation method, the calculation methods and their results of current-carrying capacity of AC conductor given by five codes and specifications, including electrical primary design manual, DL/T 5222-2005, IEEE 738-2012, IEEE 605-2008 and IEC 61597-1995, are comprehensively analyzed and compared, and different calculation methods of convection heat dissipation power are emphatically compared. It is suggested to use the modified calculation method of primary electrical manual to calculate the outdoor conductor ampacity in converter stations, and according to the different outer diameter of conductors, the recommended method by IEEE 738-2012 and the actual method by DL/T 5222-2005 can be used to calculate indoor conductor ampacity of converter station.

Key words:converter station; conductor ampacity; natural convection;forced convection

0 引 言

导体载流量计算是直流换流站设计的重要组成

部分。目前,国内直流换流站导体选择设计时,一般采用电气设计手册中的公式^[1]计算或直接引用现行 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》^[2]附录中的有关结果。然而,直流换流站导体

承受的电流应力较为复杂:直流侧导体主要承载较小谐波的直流电流;阀厅及交/直流滤波器的部分导体承载谐波含量十分丰富的交流电流或带纹波的直流电流。上述公式及规范均仅针对导体流过常规交流电流时的工况分析,并不完全适用于直流换流站中导体载流量的计算。因此,有必要开展换流站导体载流量计算方法的比较与研究,确定合适的计算方法。

1 换流站导体载流量计算原理分析

1.1 换流站导体载流量热平衡方程的修正

同交流导体类似,直流换流站中导体载流量计算的基本物理学原理同样基于热平衡方程,即导体的总散热量同总发热量相等。

空气中导体的散热途径主要包括对流散热、辐射散热和传导散热,发热来源包括焦耳热和太阳辐射吸热。考虑上述各方面因素,IEEE 605—2008 给出交流导体热平衡方程可用式(1)表示^[3]。

$$I^2 R F + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (1)$$

式中: I 为流过导体的电流,A; R 为一定温度下单位长度导体直流电阻, Ω/m ; F 为集肤效应系数; q_s 为太阳辐射吸热功率, W/m ; q_c 为对流散热功率, W/m ; q_r 为辐射散热功率, W/m ; q_{cond} 为传导散热功率, W/m ,一般忽略不计。

对于直流换流站中的导体,由于其承受电流应力较为复杂,故应将式(1)中导体电流热效应扩充至适用于换流站导体实际电流应力的情况。

根据叠加原理,考虑不同频率谐波集肤效应的损耗因数,含谐波的工作电流流过导体产生的焦耳热功率按式(2)计算。

$$q_R = \sum_{k=1}^{50} I_k^2 R_{\text{ack}} \quad (2)$$

式中: k 为谐波次数; I_k 为 k 次谐波电流; R_{ack} 为 k 次谐波电流下导体的交流电阻。

集肤效应引起的损耗因数 Y_s 由式(3)计算。

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 X_s^4} \quad (3)$$

其中:

$$X_s^2 = \frac{8\pi/K_s}{R_d \times 10^4} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{D_c - D_s}{D_c + D_s} \cdot \left[\frac{D_c + 2D_s}{D_c + D_s} \right]^2 \quad (5)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{3}{4} D^2 + \frac{1}{4} D_s^2} \quad (6)$$

式中: D 为钢芯铝绞线外径,cm; D_s 为钢芯绞线外径,cm; R_d 为导体的直流电阻。

考虑集肤效应的 k 次谐波电流下导体的交流电阻 R_{ack} 为

$$R_{\text{ack}} = (1 + Y_{s-k}) R_d \quad (7)$$

式中, Y_{s-k} 为 k 次谐波下的导体集肤效应损耗因数。

这样,换流站单导体载流量计算的热平衡方程由式(1)修正为

$$\sum_{k=1}^{50} I_k^2 (1 + Y_{s-k}) R_d + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (8)$$

对于多分裂导线及钢芯铝绞线,还需分别考虑邻近效应和钢芯磁化损耗的影响,其热平衡方程表示为

$$\sum_{k=1}^{50} I_k^2 (1 + Y_{s-k} + Y_{p-k} + Y_{c-k}) R_d + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (9)$$

式中: Y_{p-k} 为 k 次谐波下的导体邻近效应损耗因数; Y_{c-k} 为 k 次谐波下的钢芯铝绞线磁化损耗因数。集肤效应和磁化损耗因数的计算详见文献[2]。

1.2 换流站导体载流量计算实例

对于谐波含量极少的换流站直流导体,其载流量、热效应计算相比交流导体更为简单,计算时仅将交流电阻改为直流电阻即可,故本节不再赘述。这里主要针对换流站中部分除流过正常工作电流外,还流过可观谐波电流的导体,计算其谐波电流的热效应。以某 $\pm 800 \text{ kV}/10\,000 \text{ MW}$ 直流换流站换流变压器阀侧为例,其电流谐波频谱如表1所示。

由表1可以看出,换流变压器阀侧的导体除流过正常工作电流外,还流过可观的谐波电流。计算导体载流量时,一方面需确定考虑谐波的导体电阻损耗;另一方面考察不同次数谐波电流作用下集肤效应系数的区别。

以直流换流站阀厅内常用的LJ-1120纯铝绞线为例,计算得到1.05 pu下各次频率谐波电流的集肤效应损耗因数及其焦耳热,如表2所示。

由表2可以看出,对于换流变压器阀侧的LJ-1120纯铝绞线,考虑谐波后全电流产生的焦耳热功率比基波载流量焦耳热功率高约7.1%;此外,对于换流变压器阀侧,5、7次谐波贡献的焦耳热占有5~49次谐波焦耳热总和的94%。上述结果表明,谐波电流热效应在换流站导体载流量

计算中是不可忽略的,而具有较高幅值的低次谐波电流的热效应是导体选择中需要重点考虑的对象。

表 1 某 ±800 kV/10 000 MW 直流换流站换流
变压器阀侧出线谐波电流频谱

阀侧出线电流	电流值/A	
	1.0 pu	1.05 pu
直流电流 I_d	6 328.000	6 693.000
负荷电流 RMS	5 113.699	5 397.575
1 次谐波	5 007.115	5 289.105
5 次谐波	860.030 30	896.447 00
7 次谐波	525.867 00	539.773 80
11 次谐波	194.047 20	194.047 20
13 次谐波	106.073 80	106.073 80
17 次谐波	61.639 98	67.622 05
19 次谐波	58.433 10	62.318 36
23 次谐波	48.997 46	50.631 74
25 次谐波	41.905 32	41.905 32
29 次谐波	21.091 42	23.188 23
31 次谐波	21.399 77	22.972 38
35 次谐波	19.426 31	20.875 57
37 次谐波	18.624 59	19.426 31
41 次谐波	15.849 40	15.849 40
43 次谐波	12.765 86	12.765 86
47 次谐波	10.329 86	10.977 40
49 次谐波	9.990 672	10.730 720

表 2 考虑谐波的换流变压器阀侧
LJ-1120 焦耳热功率

谐波 次数 k	集肤效应 损耗因数 Y_{s-k}	交流电阻 R_{ack} $/(\text{m}\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	谐波热功率 $q_k = I_{k2} \times R_{ack}$ $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$	考虑谐波后的 总热功率 $q_R / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$
1	0.092 0	0.031 4	878.800	941.9
5	0.832 0	0.052 7	42.300	
7	0.995 0	0.057 4	16.720	
11	1.132 5	0.061 3	2.310	
13	1.163 5	0.062 2	0.700	
17	1.198 0	0.063 2	0.290	
19	1.208 0	0.063 5	0.250	
23	1.221 0	0.063 9	0.160	
25	1.225 0	0.064 0	0.110	
29	1.232 0	0.064 2	0.035	
31	1.234 0	0.064 3	0.034	
35	1.237 0	0.064 4	0.028	
37	1.239 0	0.064 4	0.024	
41	1.241 0	0.064 0	0.016	
43	1.242 0	0.064 5	0.010	
47	1.243 0	0.064 5	0.008	
49	1.243 0	0.064 5	0.007	

2 换流站导体载流量计算方法研究

国内工程交流导体载流量一般根据 DL/T 5222—2005 附录中的数值选取。在某些涉外工程中,业主提出应根据后续发布的 IEEE 738—2006 (2012) 或 IEEE 605—2008 等规范进行较为详细的

载流量计算,而其计算原理与 DL/T 5222—2005 及电气一次手册不尽相同。文献[9]对比了 IEC 61957—1995^[5]和 IEEE 738—2006^[6]的载流量计算方法,根据不同方法的计算结果,提出了不同环境条件下建议采用的方法,但未将电气一次手册解析算法及 DL/T 5222—2005 载流量计算方法纳入比较。下面从计算原理出发,结合工程设计实际需求,对比国内外 5 种载流量计算方法,探讨适用于换流站导体载流量计算的方法。

2.1 导体载流量计算的几种方法

2.1.1 导体直流电阻 R 的计算方法

各规范规定的一定温度下单位长度导体直流电阻 R 计算方法相同,按式(10)计算。

$$R = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \tag{10}$$

式中: R_{20} 为 20 ℃时导体直流电阻,Ω/m; α_{20} 为导体电阻温度系数; θ 为导体最高允许温度,℃。 R_{20} 可根据导体样本给出的数值选择,或根据导体截面积及材料电阻率计算得到。

2.1.2 对流散热功率 q_c 的计算方法

根据传热学基本原理,根据流动起因的不同,对流散热可以区分为强制对流散热和自然对流散热。前者是由于外部动力源造成的,而后者通常是由于流体内部的密度差所引起。两种流动的成因不同,流体中的速度场也有差别,换热规律不一样。因此,对流散热功率 q_c 包括强迫对流散热功率 q_{cf} 和自然对流散热功率 q_{cn} 。根据调研,现有文献对以上两个参数的计算方法不尽相同,具体情况如下。

1) 《电气一次设计手册》相关计算方法

《电气一次设计手册》给出了导体对流散热功率计算方法,对于软导线的强迫对流散热功率,风袭角取 90°,按式(11)计算。

$$q_{cf} = 0.57 \pi \lambda_f \Delta t Re^{0.485} \tag{11}$$

式中: λ_f 为导线表面空气层的传热系数,W/(m·℃); Re 为雷诺数。

$$Re = VD/v_f \tag{12}$$

式中: V 为垂直于导线的风速,m/s; D 为圆柱形导体外径,m; v_f 为导线表面空气层的动态粘度,m²/s。

$$v_f = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6 (\theta_a + \theta/2) \times 10^{-8} \tag{13}$$

式中, θ_a 为环境温度,℃。

上述方法主要用于有风条件下计算软导线的对流散热功率,计算了其中强迫对流散热的部分。但对于室内的无风或微风情况,自然对流散热效应占主导地位,《电气一次设计手册》并未涉及这一方面。此外,上述计算方法并未直接体现海拔的影响。

2) DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》采用的载流量计算方法

DL/T 5222—2005 中附录 A 给出的各型号导体载流量结果最早见于文献[7],以式(14)描述对流散热功率 Q_c 为

$$Q_c = \alpha_1 (t_m - t_0) F_1 \quad (\text{W/m}) \quad (14)$$

式中: α_1 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; t_m 为导体运行温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为周围空气温度, $^\circ\text{C}$; F_1 为单位长度对流换热面积, m^2/m 。

由于对流条件不同,分为自然对流和强迫对流两种情况。屋内自然通风或屋外风速小于 0.2 m/s ,属于自然对流换热。空气自然对流换热系数,可按大空间湍流(又称紊流)状态来考虑,自然对流换热系数按式(15)计算。

$$\alpha_{1-\text{natural}} = 1.5 (t_m - t_0)^{0.35} \quad (15)$$

对圆管导体,有

$$F_1 = \pi D \quad (16)$$

屋外配电装置中的管形导体,常受到大气中风吹的作用,风速越大,空气分子与导体表面接触的数目增多,对流换热的条件就越好,形成强迫对流换热。强迫对流换热系数 $\alpha_{1-\text{force}}$ 为

$$\alpha_{1-\text{force}} = \frac{Nu\lambda}{D} \quad (17)$$

式中: λ 为空气的导热系数,当气温为 25°C 时, $\lambda = 2.55 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; D 为圆管外径, m ; Nu 为努塞尔数,其值为

$$Nu = 0.13 \left(\frac{VD}{v} \right)^{0.65} \quad (18)$$

式中: V 为风速, m/s ; v 为空气的运动粘度系数,当气温为 25°C 时, $v = 16.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

根据上述方法,户内导体按自然对流散热原理计算,户外导体按强迫对流散热原理计算。此外,上述计算方法仍未直接体现海拔的影响,而是通过海拔修正系数对标准环境条件下的计算结果进行修正。该方法公式虽同《电气一次设计手册》形式不同,但计算结果及原理基本一样,以下将两者作为同一种方法介绍。

3) IEEE 605—2008 相关计算方法

IEEE 605—2008 IEEE 气体敞开式绝缘变电站母线设计导则(IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations)提出强迫对流散热功率按式(19)计算。

$$q_{cf} = \frac{k_a}{L} \left\{ 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} P_r^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{P_r} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \right\} A \Delta T \quad (19)$$

式中: k_a 为导线表面空气层的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; L 为导体直径, m ; P_r 为空气的普朗特数,取 0.7 ; A 为单位长度导体的迎风面积, m^2/m ; ΔT 为导体最高允许温度 T_c 和周围空气温度 T_a 之差, $^\circ\text{C}$; Re 为雷诺数。

k_a 与导体表面空气膜温度有关,按式(20)计算

$$k_a = 0.024 \, 24 + 7.477 \times 10^{-5} T_{\text{film}} - 4.407 \times 10^{-9} T_{\text{film}}^2 \quad (20)$$

式中, T_{film} 为导体表面空气膜温度,等于导体最高允许温度 T_c 和周围空气温度 T_a 的平均值。

$$T_{\text{film}} = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (21)$$

IEEE 605—2008 给出的雷诺数计算方法同《电气一次设计手册》的式(12)有所区别,雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{\rho_f LV}{\mu_f} \quad (22)$$

式中: ρ_f 为空气绝对密度, kg/m^3 ; μ_f 为空气动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

不同温度及海拔条件下, ρ_f 按式(23)计算。

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} H + 6.379 \times 10^{-9} H^2}{1 + 0.003 \, 67 \, T_{\text{film}}} \quad (23)$$

式中, H 为海拔高度, m 。

μ_f 取值同温度有关:

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{\text{film}} + 273)^{1.5}}{T_{\text{film}} + 383.4} \quad (24)$$

IEEE 605—2008 提出,对于无风或多导体近距离平行排布的情况,应计算自然对流散热功率。对于水平圆柱体自然对流散热,其引用了 IEEE 738—2006 的公式,计算风速为 0 时的自然对流功率,如式(25)所示(风袭角取 90°)。

$$q_{cn} = 4.0 \rho_f^{0.5} D^{0.75} \Delta T^{1.25} \quad (25)$$

4) IEEE 738—2012 相关计算方法

IEEE 738—2012 IEEE 计算架空裸导体电流—温度特性的规范(IEEE Standard for Calculating the Current—Temperature of Bare Overhead Conductors)指出,式(26)适用于低风速,式(27)适用于大风速,强迫对流散热功率取式(26)和式(27)的最大值(风袭角取 90°)。

$$q_{cf1} = \left[1.01 + 1.35 \left(\frac{D \rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f (T_c - T_a) \quad (26)$$

$$q_{cf2} = \left[0.754 \left(\frac{D \rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.6} \right] k_f (T_c - T_a) \quad (27)$$

式(26)、式(27)和 IEEE 738—2006 中的表达式是等价的,但 IEEE 738—2012 明确其适用的导体外径范围为 20 ~ 150 mm。

对于自然对流散热功率,按式(28)计算。

$$q_{cn}=3.645\rho_f^{0.5}D^{0.75}\Delta T^{1.25}\tag{28}$$

5) IEC 61597 相关计算方法

IEC 61597(Overhead electrical conductors – calculation methods for stranded bare conductors)仅考虑强迫对流散热,其中强迫对流散热功率按式(29)计算。

$$q_{cf}=\lambda_f N_u(T_c-T_a)\pi\tag{29}$$

式(29)中部分物理量取值同前述方法不同: λ_f 为导体表面空气膜热导率,IEC 61597 规范规定其取常数 0.025 85 W/(m · K)。

Nu 为努塞尔数,按式(30)计算。

$$Nu=0.65Re^{0.2}+0.23Re^{0.61}\tag{30}$$

Re 为雷诺数,按式(31)计算。

$$Re=1.644\times10^9vD[T_a+0.5(T_c-T_a)]^{-1.78}\tag{31}$$

式中: v 为风速,m/s; D 为导体直径,m; T_c 为导体最高允许温度,K; T_a 为周围空气温度,K。

2.1.3 辐射散热功率 q_r 的计算方法

IEEE 605—2008 及《电气一次设计手册》均采用式(32)所示的斯蒂芬 – 玻尔兹曼方程计算导体的辐射散热功率。

$$q_r=5.669\,7\times10^{-8}\times\varepsilon\pi D[(T_c+273)^4-(T_a+273)^4]\tag{32}$$

式中: q_r 为辐射散热功率,W/m; ε 为辐射散热/吸热系数(黑度系数)。 ε 取值详见表 3,对于换流站内的管型母线, $\varepsilon=0.5$;对于换流站内长期运行的铝绞线,可以认为其表面氧化变黑, $\varepsilon=0.9$ 。

表 3 典型导体表面辐射散热/吸热系数

导体状态	ε 辐射散热/吸热系数的取值	
	铜	铝
清洁表面	0.1	0.1
轻微失去光泽 (户内外安装后不久)	0.3 ~ 0.4	0.2
长期户外暴露	0.7 ~ 0.85	0.3 ~ 0.5
涂黑	0.9 ~ 0.95	0.9 ~ 0.95

2.1.4 太阳辐射吸热功率 q_s 的计算方法

根据 IEEE 605—2008,太阳辐射吸热功率 q_s 按式(33)计算。

$$q_s=\varepsilon Q_s A' K \sin \varphi\tag{33}$$

式中: q_s 为太阳辐射吸热功率,W/m; ε 为辐射吸热系数,取值同表 3; φ 为太阳辐射角,保守考虑时可

取 90°; A' 为单位长度导体垂直于太阳辐射的投影面积,对于圆柱型导体其 $A'=\pi D$,m²/m; Q_s 为太阳辐射强度,W/m²; K 为海拔辐射修正系数,IEEE 738 – 2012 给出其计算公式为

$$K=1+1.148\times10^{-4}H-1.108\times10^{-8}H^2\tag{34}$$

需要指出的是,IEEE 还给出了导线所处纬度、季节、时间、环境、高度、走向等不同因素下的太阳辐射吸热功率计算方法。针对工程设计应用的实际情况,这里仅计算其最严格条件下的数值。

2.2 导体外表面对流散热原理分析及计算方法

从第 2.1 节可以看出,在热平衡方程中,各规程规范或手册中关于导体对流散热的计算公式不尽相同:一些明确区分了强迫对流散热和自然对流散热;一些仅考虑了强迫对流散热。在强迫对流散热方面,计算公式也不尽相同,因此,对流散热原理进行简要分析,从工程应用和传热原理两方面出发,讨论选择相应合适的计算方法。

2.2.1 强迫对流散热计算结果分析

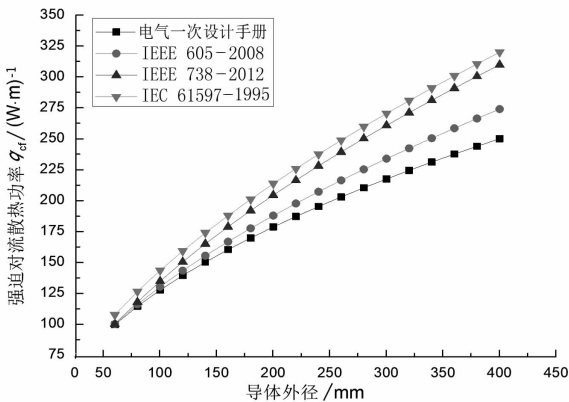


图 1 不同计算方法得到的导体强迫对流散热功率(海拔 0 m)

采用第 2.1 节对应的不同公式,分别计算导体在海拔为 0 m 和 1000 m 时的强迫对流散热功率。基本计算条件为:环境温度 25 ℃,导体最高允许温度 80 ℃,风速 0.5m/s。海拔为 0 m 的计算结果如图 1 所示(在这一条件下,《电气一次设计手册》计算结果和 DL/T 5222—2005 计算结果一致,下同)。可以看出,对于外径 60 ~ 400 mm 范围内的导体,采用《电气一次设计手册》计算得到的强迫对流散热功率最小,即最保守。然而,《电气一次设计手册》相关计算方法并未给出海拔影响,需对其进行修正,以计算不同海拔条件下的载流量。

根据传热学基本原理,容易知道海拔对强迫对流散热的影响主要体现在海拔升高、空气密度下降、

强迫对流散热效应减弱。《电气一次设计手册》及 DL/T 5222—2005 相关计算方法中,雷诺数的计算应考虑海拔修正,其计算公式应修正为式(35),即

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu_f} \quad (35)$$

空气密度随着海拔高度的改变而改变,但是特定模型特定区域的尺寸和流速是不变的。参照文献[8-9],根据空气密度与海拔的关系,可以得到 Re 的海拔修正公式为

$$Re(H) = \eta(H) Re(0) \quad (36)$$

式中: $Re(H)$ 为海拔 H 处的雷诺数; $\eta(H)$ 为海拔为 H 处的空气相对密度,表达式为

$$\eta(H) = (1 - 2.25577 \times 10^{-5} H)^{5.2559} \quad (37)$$

上述雷诺数 Re 的海拔修正方法,和 IEEE 738—2012 中空气绝对密度 ρ_f 和空气动力粘度 μ_f 关于海拔 H 的关系式是等价的,可以得到相同的修正结果。

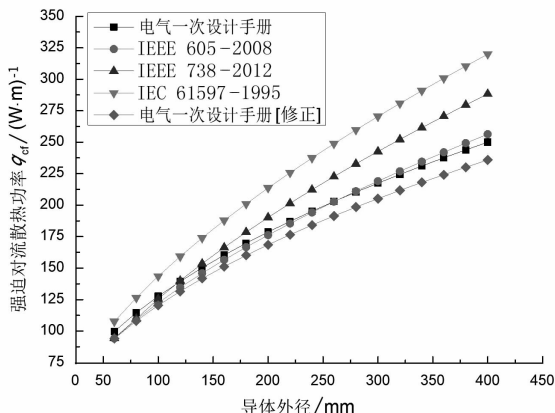


图2 不同计算方法得到的导体强迫对流散热功率(海拔1000 m)

采用上述修正后的《电气一次设计手册》计算方法,计算海拔为1000 m的不同直径导体的强迫对流散热功率,结果如图2所示。综合图1和图2可以看出,采用未修正的《电气一次设计手册》及 IEC 61597—1995 方法计算的强迫对流散热功率并没有随着海拔增加而变化;而 IEEE 605—2008 及 IEEE 738—2012 方法计算的高海拔下强迫对流散热功率明显下降;采用修正后《电气一次设计手册》计算方法得到的强迫对流散热功率同样随海拔增加而下降。

从计算结果看,海拔为0 m时,各种方法计算的强迫对流散热功率计算值大小有“IEC 61597—1995” > “IEEE 738—2012” > “IEEE 605—2008” > “电气一次设计手册”的关系;考虑海拔修正时,有“IEEE 738—2012” > “IEEE 605—2008” > “电气一次设计手册(修正)”的关系。IEC 61597—1995 主要针对输电线路,其散热环境好于变电站、换流站

内,故其散热功率计算值最大,计算得到的导体载流量也最大,有利于最大程度地利用导体载流面积,提升输电线路的经济性。而修正电气一次设计手册计算方法得到的散热功率最小,计算得到的导体载流量也最小。因此,对于换流站内的户外导体,若保守考虑,工程中可采用修正的《电气一次设计手册》的方法计算导体的强迫对流散热功率,具有足够的裕度。

2.2.2 自然对流散热计算结果分析

根据第2.1节内容,对于换流站户内导体,由于一般没有均匀风速的空气流动,没有强迫对流散热过程,应采用自然对流散热原理计算其对流散热功率。分别采用不同方法计算了导体的自然对流散热功率,如图3所示,虽然 IEEE 605—2008 在 IEEE 738—2012 给出的公式基础上将系数四舍五入、向上取整,但方法是统一的,其散热功率随外径增加而增加的趋势是一致的。根据 DL/T 5222—2005 的计算结果,热源向周围传递的热量与导体外径成正比,同 IEEE 计算结果相比存在一处转折点:当导体外径小于100 mm时,DL/T 5222—2005 的自然对流换热功率计算结果比 IEEE 小,当导体外径大于100 mm时,DL/T 5222—2005 的自然对流换热功率计算结果比 IEEE 计算结果大,且差值逐渐增加。实际工程中,可根据导体的外形尺寸,选择相对保守的计算方法。

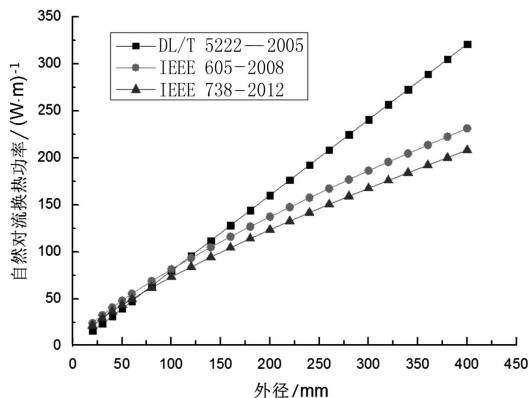


图3 不同计算方法得到的导体自然对流散热功率

3 结 语

上面根据载流量计算的基本原理,给出了换流站中不同载流工况下导体载流量计算的基本原则,确定了适用于换流站导体载流量计算的修正的热平衡方程;在载流量计算方法方面,综合分析比较了电气一次设计手册、DL/T 5222—2005、IEEE 738—

2012、IEEE 605—2008、IEC 61597—1995 等 5 个规程规范给出的交流导体载流量计算方法及其计算结果,重点对比不同的对流散热功率计算方法。分析表明,对于适用于户外导体的强迫对流散热功率,IEEE 738-2012 给出的计算方法综合考虑了温度、海拔等因素的影响,比《电气一次设计手册》计算方法更为完备,而根据其原理修正的《电气一次设计手册》计算方法的计算结果则最为保守。考虑 IEEE 738—2012 不适用于外径大于 150 mm 的导体,结合国内工程设计实际情况,建议采用修正的《电气一次设计手册》计算方法计算换流站户外导体载流量。对于适用于户内导体的自然对流散热功率,导体外径大于 100 mm 时采用 IEEE 738—2012 计算方法更保守;导体外径小于等于 100 mm 时,采用 DL/T 5222—2005 计算方法更保守。相关研究结论可供涉外工程设计及换流站导体选择设计相关规程规范的编制参考使用。

参考文献

[1] 水利电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,1989.

+++++

(上接第 26 页)

[3] 王惠中,朱宏毅,张荧,等. 稀疏矩阵在电网网络拓扑分析中的应用与研究[J]. 电网与清洁能源,2014,30(12):1-4.

[4] 崔岩. 邻接矩阵染色法及其在电力系统网络拓扑分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(16):52-56.

[5] 朱文东,刘广一,于尔铿,等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术,1996,20(3):30-33.

[6] 苏义荣,邱淘西,邱家驹. 配电网拓扑分析方法的研 究[J]. 浙江电力,2001,20(5):10-14.

[7] 李盟,秦立军,郭庆,等. 基于 CIM 模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22.

[8] 王明鸣,孟相如,李纪真,等. 基于着色树优化的网络 并发链路故障快速恢复方法[J]. 计算机应用研究, 2015,32(6):1822-1825.

[9] 王小飞,胡志坚,吴方劼,等. 基于改进邻接矩阵的稀疏技 术及其在电力系统计算中的应用[J]. 电力系统保护与控 制,2016,44(9):50-56.

[10] 姚玉斌,叶爽利,吴志良,等. 稀疏矩阵法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):1-5.

[11] 周琰,周步祥,邢义. 基于邻接矩阵的图形化网络 拓扑分析方法[J]. 电力系统保护与控制,2009, 37(17):49-52.

[2] 导体和电器选择设计技术规定:DL/T 5222—2005 [S],2005.

[3] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors;IEEE 738-2012[S],2012.

[4] IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations; IEEE 605-2008[S],2008.

[5] Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors;IEC 61597-1995[S],1995.

[6] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors;IEEE 738-2006[S],2006.

[7] 邱岭. 导体载流量计算:导体及电气设备选择文集(第三集)[C]. 北京:全国电气工程标准技术委员会导体 及电气设备选择分委员会,1999.

[8] 刘士樟. 铝绞线钢芯铝绞线交直流电阻及载流量的计 算[J]. 电线电缆,1988(6):6-12.

[9] 王飞,张浏骏,许佩佩,等. 海拔高度对变频器散热影 响的研究[J]. 电子机械工程,2016,32(1):9-15.

[10] 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版 社,2006.

作者简介:

韩毅博(1991),男,硕士,工程师,主要从事换流站和变 电站的设计研究工作。 (收稿日期:2021-04-27)

+++++

[12] 杨冬锋,周苏荃,刘隽,等. 基于关联矩阵化简的电网 拓扑辨识新方法[J]. 华东电力,2014,42(11):2254 -2259.

[13] 黄佳乐,杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算 法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.

[14] 徐彪,尹项根,张哲,等. 矩阵算法和优化算法相结 合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化,2019, 43(5):152-161.

[15] 卢虹宇,蔡月明,刘明祥,等. 低压配电台区拓扑辨识 及校核方法[J]. 电气自动化,2020,42(3):95-98.

[16] 蒋玮,汤海波,祁晖,等. 基于集成深度神经网络的配 电网联络关系辨识技术[J]. 电力系统自动化,2020, 44(1):101-108.

作者简介:

曾顺奇(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力 系统运行与控制;

吴杰康(1965),男,工学博士,教授,博士生导师,研究 方向为电力系统运行与控制等;

李欣(1981),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力 系统运行与控制;

刘国新(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 运行与控制、冷热电联供运行优化等。

(收稿日期:2021-04-02)

和田电网动态无功补偿装置选址定容方案研究

邵沈会, 刘新刚

(中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要:针对和田电网冬季电力缺额较大的问题,提出利用动态无功补偿装置(SVG)提高和田地区事故后电压恢复能力的措施,以提高相关断面下网能力,满足地区电力需求。主要对 SVG 在电网中的安装位置和安装容量进行综合分析比较,制定科学合理的 SVG 配置方案,有效提升电网电压支撑能力,进而提高电网受电能力,保证电网安全稳定运行,满足经济社会发展需求。

关键词:和田电网;SVG;断面下网功率;配置方案

中图分类号:TM 74 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0057-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210411

Research on SVG Siting and Capacity Determination Scheme for Hetian Power Grid

Shao Shenhui, Liu Xingang

(Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CEEC, Urumqi 830001, Xingjiang, China)

Abstract:In view of large power shortage in winter in Hetian power grid, the measures to improve the voltage recovery ability is proposed by using SVG after the fault happening in Hetian area, so as to improve the power transmission ability of relevant section and meet the regional power demand. A comprehensive analysis and comparison are carried out mainly for the installation locations and installation capacities of SVG in power grid, and a scientific and reasonable SVG configuration scheme is given to effectively improve the voltage support capacity of power grid, thereby improving the receiving capacity of power grid, ensuring the safe and stable operation of power grid and meeting the needs of economic and social development.

Key words:Hetian power grid; SVG; power transmission ability of relevant section; configuration scheme

0 引言

2018 年 12 月至 2019 年 1 月期间,和田及喀什地区大范围限电,电力缺额主要来自下述三方面原因:1)和田及喀什地区大量电采暖负荷的接入;2)和田地区“电调服从水调”的政府政策使得相关水电机组无法运行,加大了和田及喀什地区的电力缺额;3)华威电厂缺煤且机组运行可靠性弱。

尽管已经采取了一系列措施,但和田电网仍存在一定的电力缺额,为此提出利用 SVG (static var generator) 提高和田地区事故后电压恢复能力,以提高相关断面下网能力。目前主要有两种方案:1)选

取一个关键变电站,部署一套大容量 SVG;2)选取多个变电站,分别部署小容量 SVG。综合考虑建设周期、成本、占地以及单个设备故障后对电网的影响,拟采用方案 2,主要选择 100 Mvar 以内的 SVG 作为研究对象。

1 SVG 在电网中的作用

SVG^[1-4]是目前最先进的无功功率补偿技术,与传统无功补偿装置相比,其具有明显的优势,如低电压下补偿能力强、响应速度更快、抑制电压闪变能力更强、运行范围更宽、谐波含量低、占地面积小等。SVG 输出无功电流与系统电压无关,能够双向连续

调节,无功电流不受系统电压影响,具备一定的过载能力(1.1~1.5 倍),在暂稳状态,对电网电压支撑作用明显,可有效提高电网受电能力。同时,SVG 可以独立分相控制,有利于解决系统的相间平衡问题,在系统不对称跌落时,更好地提供电压支撑。SVG 在系统故障条件下输出电流可控,控制灵活,在短路电流接近极限的系统场合可避免短路电流进一步增大。

2 SVG 选址定容分析

2.1 SVG 选址定容原则

1)目前 SVG 设备已有应用的容量分别为 60 Mvar、80 Mvar、100 Mvar。考虑设备可靠性,和田电网 SVG 选择已有应用系列进行分析。

2)为尽量减小计算误差,均保证事故后稳态电压介于 0.98~0.99 pu 之间。

3)考虑 SVG 容量小于 100 Mvar,单站只考虑部署一套 SVG,且均部署在 220 kV 变电站 35 kV 侧,控制目标为和田电网 220 kV 系统母线电压不低于 0.9 pu。

2.2 边界条件

- 1)华威电厂单机满发,波波娜水电站单机满发;
- 2)故障类型为 750 kV 车和线和侧三相接,0.1 s 后跳开线路两侧;
- 3)按和田电网现有网架结构进行计算分析,750 kV 莎车—和田为单线单变运行。

2.3 基于仿真软件的 SVG 选址定容分析

基于 PSASP 仿真软件,分析不同容量及安装位置情况下,750 kV 巴楚—莎车—和田输变电工程建成后的 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面输电能力。

1)车和断面静稳极限计算

针对 750 kV 巴楚—莎车—和田输变电工程建成后的 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面,分析所得输电断面静稳极限约 530 MW(考虑 15% 的储备裕度)。仿真曲线如图 1 所示。

2)SVG 容量的灵敏性分析

针对于田变电站部署单台 SVG,分别比较无 SVG、30 Mvar、35 Mvar、45 Mvar、52 Mvar、60 Mvar(以上为低于 100 Mvar 的常规型号),分析 SVG 容量对断面功率的影响,计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,同一安装地点,随着 SVG 容量的提升,750 kV 车

和 +220 kV 叶羌断面下网功率相应提升。

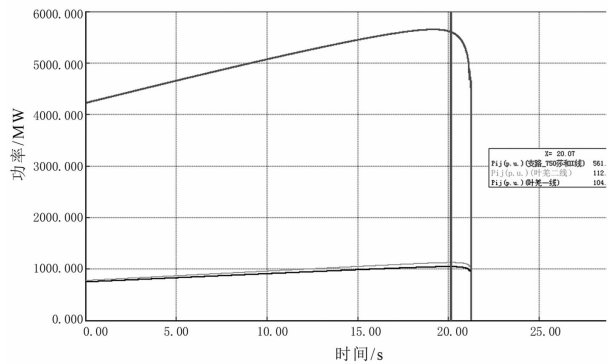


图 1 输电断面静稳极限计算

表 1 SVG 容量的灵敏性分析 单位:MW

工况	无 SVG	30 Mvar	35 Mvar	45 Mvar	52 Mvar	60 Mvar
车和 + 叶羌功率	292	320	328	339	343	351
功率提升	0	28	36	47	51	59

无 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面:通过潮流计算分析其下网功率约 292 MW;通过暂态计算分析,如图 2 所示,无稳控措施暂态电压波动最大达母线额定电压 1.033 倍,最小达母线额定电压 0.987 倍。

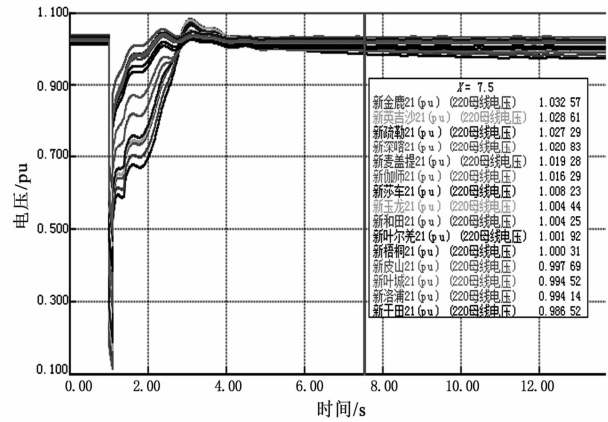


图 2 无 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面无稳控措施暂态电压波动

于田变电站部署一套 60 Mvar 的 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面:通过潮流计算分析,下网功率约 351 MW;通过暂态计算分析,如图 3 所示,断面无稳控措施暂态电压波动最大达到母线额定电压 1.024 倍,最小达母线额定电压 0.981 倍。

3)SVG 安装位置的灵敏性分析

首先,针对 750 kV 车和 N-1 故障,对不同厂站低电压情况进行分析,选取 220 kV 厂站电压曲线,如图 4 所示。

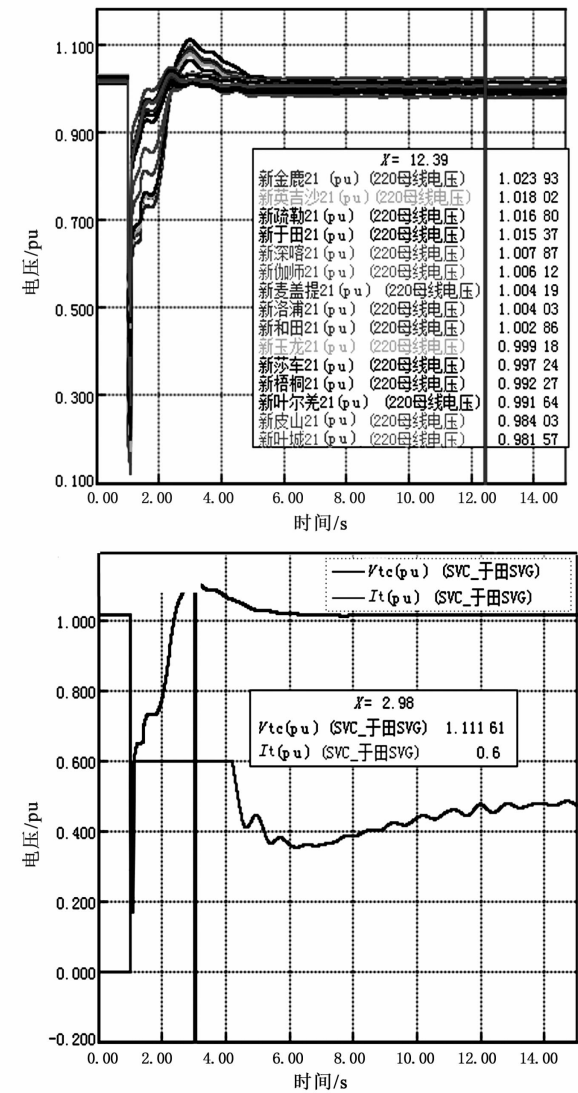


图 3 于田变电站部署一套 60 Mvar 的 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面无稳控措施暂态电压波动

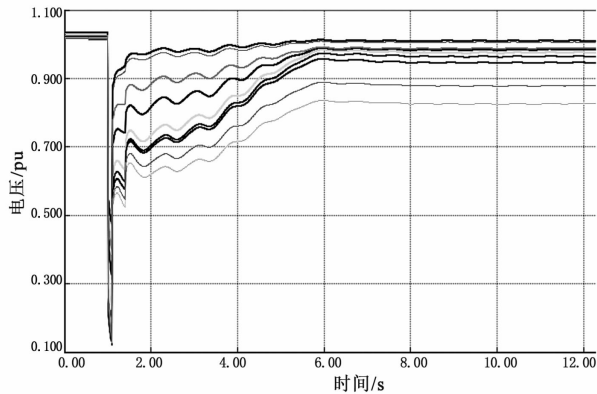


图 4 750 kV 车和 N-1,220 kV 母线低电压情况

由图 4 可以看出,车和 N-1 故障情况下,220 kV 母线电压偏低,按电压最低到最高排序,SVG 可考虑的安装顺序依次为于田→洛浦→和田→皮山→梧桐→玉龙→叶城。但考虑到和田主变压器 N-1 故障情况下 SVG 无法发挥作用,同时 220 kV 玉龙变电站有

常规电源(华威电厂)电压支撑以及 220 kV 叶城变电站 2019 年也将建成恰木萨水电站。因此可考虑的 SVG 安装点分别为于田、洛浦、皮山、梧桐变电站。

进一步,选定 SVG 容量(以 45 Mvar 为例)。分别比较 220 kV 于田变电站,220 kV 洛浦变电站,220 kV 皮山变电站,220 kV 梧桐变电站不同安装位置对断面功率的影响。计算结果如表 2 所示,具体计算曲线如 5 图所示。由表 2 可知,同一 SVG 容量,220 kV 于田变电站与 220 kV 洛浦变电站对 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面功率提升相近,其次为 220 kV 皮山变电站,最后为 220 kV 梧桐变电站。该计算结论也与按低电压水平的分析结果基本一致。

为细化选址方案,进一步缩小 SVG 选点范围,考虑梧桐变电站 SVG 提升输电功率效果相对较弱,SVG 选点暂不考虑梧桐变电站。

表 2 安装位置的灵敏性分析 单位:MW					
工况	无 SVG	于田变电站	洛浦变电站	皮山变电站	梧桐变电站
车和 + 叶羌功率	292	339	337	330	325
功率提升	0	47	45	38	33

为进一步理论分析不同安装位置及不同安装容量 SVG 对电压波动的抑制能力,首先采用简单的估算公式,简化的电压波动计算公式为

$$d \approx \frac{\Delta Q}{S_B} \times 100\% \tag{1}$$

其中,电压变动 d 定义为

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \tag{2}$$

式中: ΔU 为电压的变化值; U_N 为系统标称电压; ΔQ 为无功的变化量; S_B 为研究母线的短路容量。由此可知,同一位置 SVG 安装容量越大,电压提升效果将越明显;同时,当 SVG 安装容量相同时,安装位置的系统短路容量越小,电压提升效果将越明显,反之亦然。

于田变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面:通过潮流计算分析,下网功率约 339 MW;无稳控措施暂态电压波动最大达母线额定电压 1.025 倍,最小达母线额定电压 0.986 倍,如图 5 所示。

洛浦变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面:通过暂态计算分析,下网功率约 337 MW;通过潮流计算分析,如图 6 所示,无稳控措施暂态电压波动最大达到母线额定电压 1.024 倍,最小达到母线额定电压 0.984 倍。

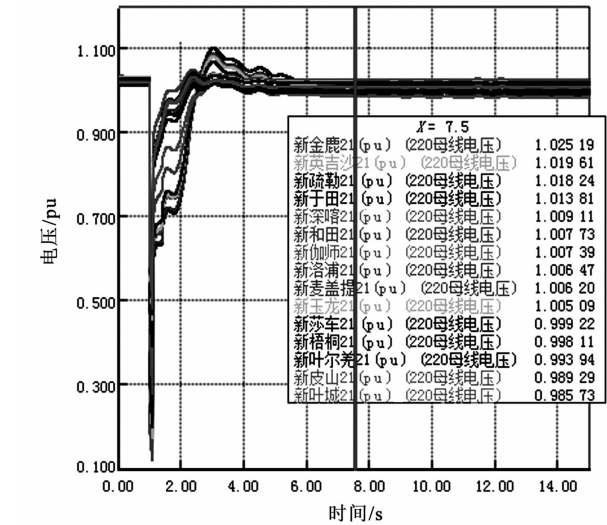


图 5 于田变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时，750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面无稳控措施暂态电压波动

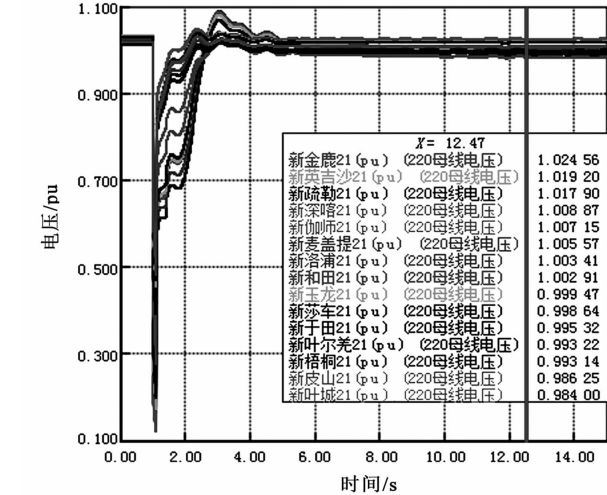
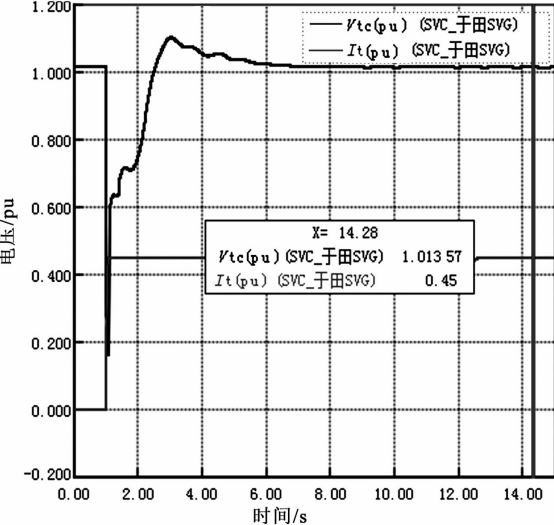
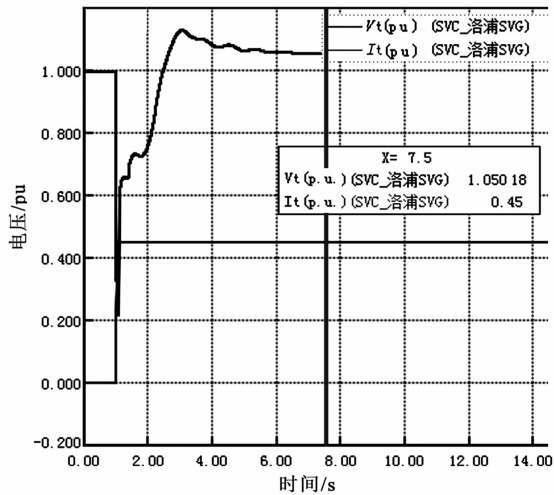


图 6 洛浦变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时，50 kV 车和 +220 kV 叶羌断面无稳控措施暂态电压波动



皮山变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时，750 kV

车和 +220 kV 叶羌断面:通过潮流计算分析,下网功率约 330 MW;通过暂态计算分析,如图 7 所示,无稳控措施暂态电压波动最大达母线额定电压 1.03 倍,最小达母线额定电压 0.981 倍。

进一步分析其他 SVG 容量情况下,不同选点输电功率提升效果。洛浦和于田变电站效果接近,不再赘述。仅针对 220 kV 皮山变电站,比较不同容量 SVG 对断面功率的影响。计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,其特性与表 1 相似,随着 SVG 容量的提升,断面功率相应提升。

综上分析,由于故障情况下于田变电站处于电网末端,电压最低,系统短路容量也最小,因此采用同一容量 SVG 时于田变电站系统电压提升最大,最小波动电压达母线额定电压 0.986 倍,同时对断面

功率提升最大,其次为洛浦变电站。

表 3 皮山变电站 SVG 容量的灵敏性分析						单位:MW
工况	无 SVG	30 Mvar	35 Mvar	45 Mvar	52 Mvar	
车和 + 叶羌功率	292	310	316	330	334	
功率提升	0	18	24	38	42	

4)和田地区 SVG 选址定容方案

根据目前的电力平衡分析,考虑和田地区电采暖负荷的同时率为 0.4,当华威电厂单机、波波娜水电站单机时,和田地区电力缺额为 100 MW 左右。根据选址、定容计算结论,可初步得到大于 100 MW 功率提升的几种典型方案,如表 4 所示,给出几种典型方案的功率预估值(根据表 1 和表 3 的计算结果相加)及造价。

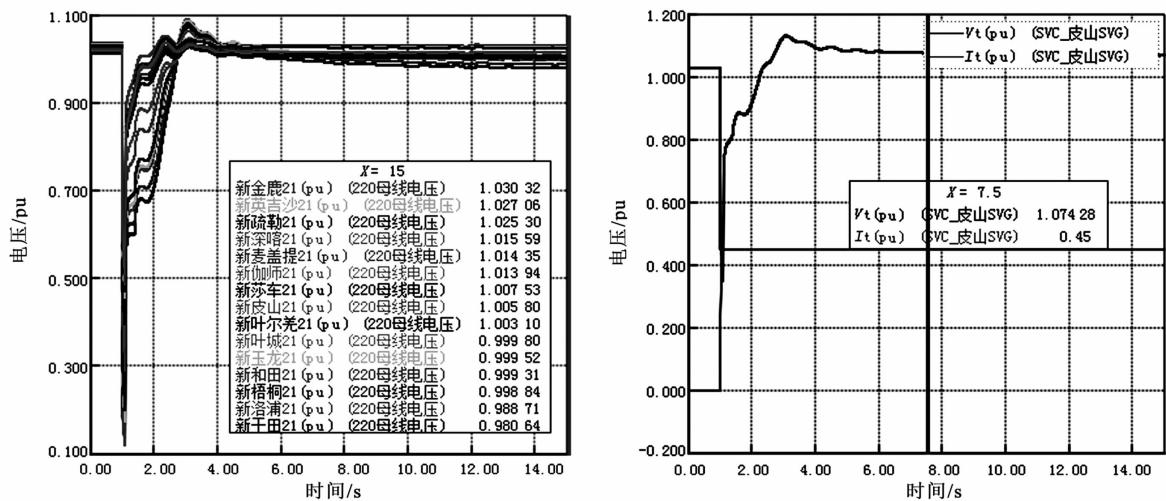


图 7 皮山变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG 时, 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面无稳控措施暂态电压波动

方案 1: 于田、洛浦、皮山变电站各部署一套 45 Mvar 的 SVG。经实际仿真计算,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率由 292 MW 提升至 398 MW, 实际提升了 106 MW。

表 4 4 种典型方案

方案	静稳能力提升值/MW	暂稳能力提升值/MW	设备本体造价/万元	设计施工/万元	合计/万元
方案 1	61	106	1920	300	2220
方案 2	63	113	2140	300	2440
方案 3	64	119	2250	300	2550
方案 4	62	108	2200	300	2500

方案 2: 于田、洛浦变电站各部署一套 52 Mvar 的 SVG,皮山变电站部署一套 45 Mvar 的 SVG。经实际仿真计算,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率由 292 MW 提升至 405 MW,实际提升了 113 MW,较方案 1 多提升 7 MW,但是工程投资较方案 1 高 220 万元。

方案 3: 于田、洛浦、皮山变电站各部署一套 52 Mvar 的 SVG。经实际仿真计算,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率由 292 MW 提升至 411 MW,实际提升了 119 MW,较方案 1 多提升 13 MW,但是工程投资较方案 1 高 330 万元。

方案 4: 于田、洛浦变电站各部署一套 60 Mvar 的 SVG,皮山变电站部署一套 30 Mvar 的 SVG。经实际仿真计算,750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率由 292 MW 提升至 400 MW,实际提升了 108 MW,较方案 1 多提升 2 MW,但是工程投资较方案 1 高 280 万元。

考虑到和田 750 kV 变电站二期扩建工程正在实施,综合考虑经济性及能力提升效果,建议采

取方案 1 作为本期和田电网 SVG 选址定容方案,能够满足近几年和田电网电力缺额及系统稳定,和田 750 kV 变电站二期扩建工程建成后,和田电网断面下网电力受限问题将得到明显改善。

3 结 语

- 通过上面计算,可得到如下结论:
- 1) 同一安装地点,不同 SVG 容量对 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率提升影响存在差异,容量越大,功率提升越高。
 - 2) 同一容量,不同安装地点对 750 kV 车和 +220 kV 叶羌断面下网功率提升影响存在区别,系统电压越低、短路容量越小,则对系统断面下网功率提升越好。从优往劣排序如下:220 kV 于田变电站 > 220 kV 洛浦变电站 > 220 kV 皮山变电站 > 220 kV 梧桐变电站。

3) 通过分析,有多种方案可填补和田地区电力缺额。综合考虑经济性及能力提升效果,建议采取方案 1: 于田、洛浦、皮山变电站各一套 45 Mvar。

4) 通过对和田电网 SVG 选址定容进行分析,制定科学合理的 SVG 配置方案,可有效提升电网电压支撑能力,进而提高电网受电能力,促进经济社会又好又快发展。

参考文献

[1] 武丽霞. 动态无功补偿装置(SVG)的研究及应用[J]. 能源与节能,2014(3):155-157.

一种降低高铁牵引供电系统负序电流的光伏发电接入方法

夏焰坤^{1,2}

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;
2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:光伏发电是一种绿色节能的发电技术,近年来在电力系统中得到大力发展,但在牵引供电系统中尚未有工程应用。针对光伏接入牵引供电系统的情况,提出了一种利用光伏能源来降低牵引供电系统负序的方法。根据牵引系统供电臂负荷电流差值选择光伏接入方式,理论分析了改善牵引供电系统负序的基本原理,提出了相应的控制方法。针对不同的负荷情况,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了电气仿真模型进行分析,仿真结果表明:所提方法和控制策略能有效改善牵引供电系统负序电流问题。

关键词:光伏;负序;铁路;牵引供电系统;控制

中图分类号:TM 315 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0062-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210412

A Photovoltaic Generation Access Method to Reduce Negative Sequence Current of High-speed Railway Traction Power Supply System

Xia Yankun^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) generation is a green energy-saving power generation technology that has been vigorously developed in power system in recent years, but there is no engineering application in traction power supply system. Aiming at the situation of photovoltaic access traction power supply system, a method of using photovoltaic energy to improve the negative sequence of traction power supply system is proposed. According to the load current difference of power supply arm of traction system, theoretical analysis is used to select the photovoltaic access method and to improve the basic principle of the negative sequence of traction power supply system, and then the corresponding control method is proposed. According to different load conditions, the electrical simulation model is built on the Matlab/Simulink simulation platform. The simulation results show that the proposed method and control strategy can effectively improve the negative sequence problem of traction power supply system.

Key words: photovoltaic; negative sequence; railway; traction power supply system; control

0 引 言

牵引供电系统是高速铁路电力机车的唯一供电来源,其供电质量水平一方面会对机车安全可靠运行带来影响,另一方面也会对三相供电系统造成影响^[1-5]。目前高速铁路主要的电能质量问题在于单

相大功率牵引负荷造成的三相供电系统的不平衡,即负序问题^[6-12]。

光伏发电^[13]作为一种绿色、节能的新能源发电技术,在全世界电力系统中得到广泛应用。传统的光伏发电领域研究主要关注点在三相电力系统,而随着高速铁路的快速发展,牵引供电系统伴随铁路线路的延伸也发展成一个非常庞大的供电网络。在日照充足的地区,如果能够将光伏能源引入到牵

基金项目:牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1907);四川省科技计划(2020YFG0184)

引供电系统将会对提高牵引供电系统的绿色、环保水平。为加快铁路行业应用新能源技术,铁道部门制定了多项相关规范,相关的研究报告和工程实际应用相对较少。如何有效利用光伏电能,必将成为牵引供电系统一个重要的课题。

文献[14]研究了在全电力电子化的独立贯通牵引供电系统的直流母线中接入新能源的构想,用于综合能源利用,但其主要适用于未来贯通供电系统。文献[15]提出了一种光伏接入方案,但未考虑牵引供电系统三相-单相供电结构的特殊性,未能合理利用光伏接入电能来改善牵引供电系统自身的问题。为此,从牵引供电系统不对称供电结构角度出发,以平衡接线牵引变压器牵引变电所为例,提出了一种既能充分利用光伏电能,又能有效改善牵引供电系统负序的光伏接入方法。

首先,提出了一种光伏接入方法;其次,分析了负序改善原理,并提出了变流器控制策略;最后,在仿真平台上搭建了模型进行验证,论证所提方法的有效性。

1 光伏接入方案结构

以平衡接线牵引变压器变电所为例,系统结构如图1所示。三相电网电压经过三相-两相平衡变压器对称变换成 α 、 β 两单相电压。光伏发电系统电池组件采用集中接入的方式,其直流母线通过两组单相变流器分别与 α 、 β 两相供电臂相连,实现并网。

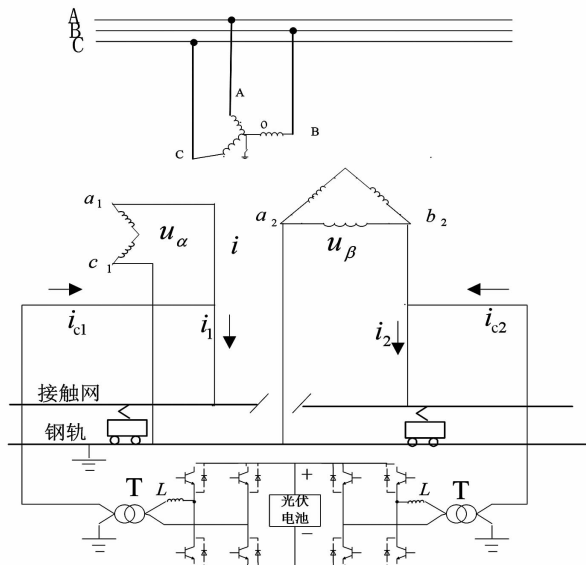


图1 光伏接入牵引供电系统方案

两组变流器安装容量相同,但其每组变流器馈入供电臂的电流需要根据负荷情况进行合理分配。并网变流器需要检测 α 、 β 两相牵引负荷的电流或功率大小,与自身输出电流或功率进行比较,经过分析判断,计算出反馈给 α 、 β 两相的并网电流或功率。图1中T为升压变压器,起到隔离和升压作用。

2 光伏接入降低负序原理分析

为简化分析,不考虑机车负载谐波分量,假设平衡变压器次边两个端口电压为

$$\begin{cases} u_{\alpha}(t) = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ u_{\beta}(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t - 90^{\circ}) \end{cases} \quad (1)$$

对应的供电臂负载电流分别为

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sqrt{2}I_1\sin(\omega t - \varphi_1) \\ i_2(t) &= \sqrt{2}I_2\sin(\omega t - 90^{\circ} - \varphi_2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, U 、 I_1 、 I_2 分别为端口电压和端口电流有效值。

由文献[16]相关理论可知,负载2个端口电流共同作用时的原边三相电流表达式为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j\psi_p} \\ \sum_{p=1}^2 I_p e^{-j\psi_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(4)中: K 为变压器次边端口电压有效值 U 与一次侧线电压 $\sqrt{3}U_A$ 之比; I_p 为负载端口电流有效值; p 为端口号, $p=1,2$; ψ_p 为初相角(端口 p 的接线角)。

再利用对称分量法可分解出正、负序电流,可得正序电流和负序电流通用表达式分别为

$$\begin{aligned} i^+ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j\varphi_p} \\ i^- &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^2 KI_p e^{-j(\varphi_p + \varphi_p)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, φ_p 为功率因数角。

未接入光伏时,牵引系统两供电臂电压和电流构成的正序和负序见图2所示。

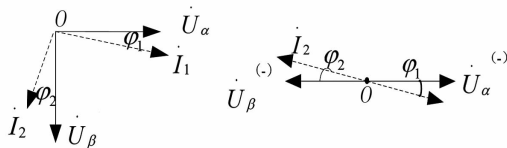


图2 正序和负序

负序合成电流大小为

$$I^- = K \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2)^2 + (I_1 \sin \varphi_2 - I_2 \sin \varphi_2)^2} = K \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \tag{5}$$

式(5)说明,负序合成电流不仅与两供电臂电流大小有关,还和功率因数角差值有关。两供电臂电流有功成分在坐标图上共线反方向,起到相互抵消作用。

接入光伏电能后,仅以光伏馈入有功电流为例,负序合成电流为

$$I^- = K \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2 - I_{c1} + I_{c2})^2 + (I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2)^2} \tag{6}$$

从式(6)可以看出光伏系统接入改变了原有系统负荷有功分配,灵活调节输出电流 I_{c1} 和 I_{c2} 的分配,将有利于降低系统负序合成电流的大小。

通常采用交直交变换的电力机车功率因数较高,忽略其无功,仅探讨有功影响,则式(5)简化为

$$I^- = K |I_1 - I_2| \tag{7}$$

说明此时负序电流与两供电臂电流差额有关,当两供电臂负荷电流相等时,负序电流为 0。

下面以高铁负荷为例,不计无功影响,仅以有功来简要分析 I_{c1} 和 I_{c2} 的分配对系统负序电流的影响。

假设光伏接入的等效额定电流为 $I = I_{c1} + I_{c2}$, 当 $I \leq |I_1 - I_2|$ 时,光伏容量补偿负序不足,光伏电流完全馈入重载供电臂来减小负序,如图 3 所示(以 $I_2 > I_1$ 为例),此时 $I^- = K_p |I_1 - I_2 - I|$ 。相反,如果此时光伏馈入电流完全到轻载臂,将会加大负序电流,则 $I^- = K |I_1 - I_2 + I|$ 。

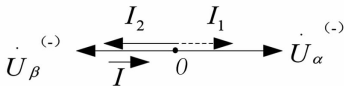


图 3 光伏接入负序

当 $I > |I_1 - I_2|$ 时,说明光伏容量足够补偿负序,此时光伏电流同时馈入两供电臂,既要补偿电流差额,使得牵引负荷功率均衡,还要平衡多余的电流,使得合成负序为 0,如图 4 所示,此时两组变流器馈入电流为

$$\begin{cases} I_{c1} = \frac{I - |I_1 - I_2|}{2} \\ I_{c2} = \frac{I + |I_1 - I_2|}{2} \end{cases} \tag{8}$$

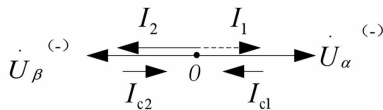


图 4 负序

如果两供电臂均处于空载情况下,则两变流器输出电流大小相等,相位相差 90° ,合成负序也为 0,如图 5 所示,此时 $I_{c1} = I_{c2} = \frac{I}{2}$ 。

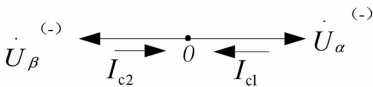


图 5 仅光伏接入负序

由上述分析可知,无论是轻载、带载情况下,通过合理分配馈入的供电臂,光伏接入后牵引系统合成负序电流要么为 0,要么会得到明显减小。

3 电流检测与控制

光伏接入系统变流器电流检测与控制见图 6 所示。首先,对两供电臂负载电流有功分量进行检测,得到有效值 I_1 和 I_2 , 电流差值即为不平衡电流。不平衡电流与光伏电池输出电流指令 I 相比较进行判断,判断逻辑见负序分析原理,从而计算出两变流器电流分配指令 I_{c1} 和 I_{c2} 。指令电流分别乘以对应的端口同步信号,即可得到变流器端口电流的瞬时值,该瞬时值经过闭环控制得到变流器调制信号。

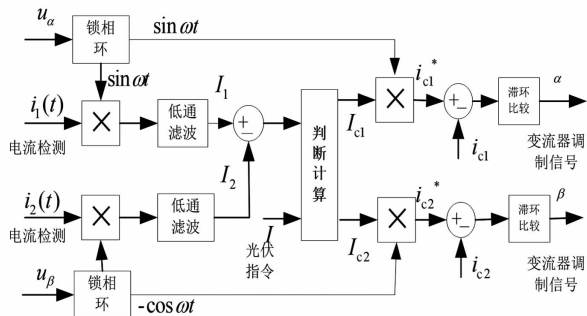


图 6 电流检测及控制框

从而变流器端口的输出电流指令为

$$\begin{bmatrix} i_{c1}(t) \\ i_{c2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c1} \sin \omega t \\ I_{c2} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix} \tag{9}$$

4 仿真分析

为验证所提方法的有效性,在 Matlab/Simulink

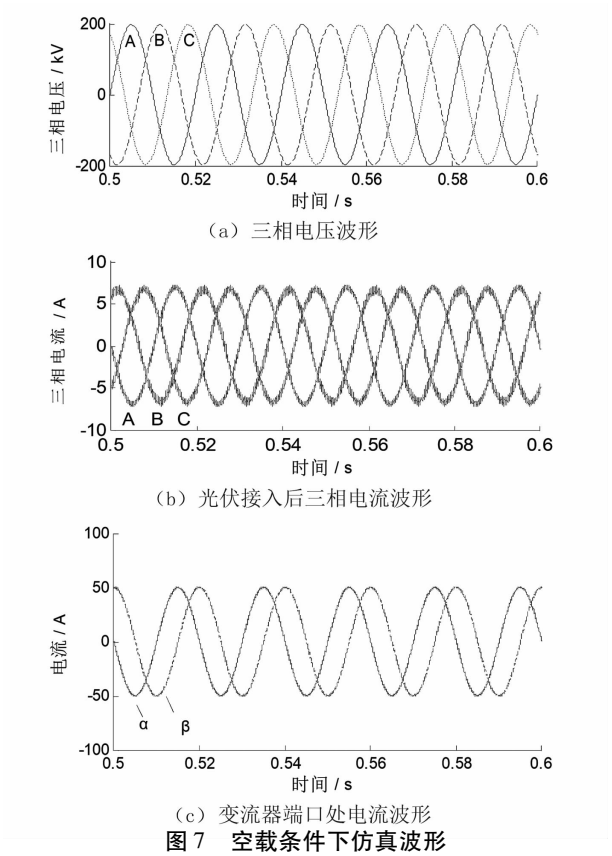
平台上建立了相应的仿真模型,参数见表 1 所示。其中变流器采用电流闭环控制、滞环调制方式。

为直观看补偿效果,负载分空载和带载 2 种情况分别展开仿真。

表 1 仿真参数	
参数	值
三相系统电压/kV	220
平衡变压器变比	220:27.5
升压变压器变比	0.93:27.5
光伏容量/MW	2
直流电压/kV	22

1) 仿真情况 1:两供电臂空载

当两供电臂处于空载的情况下,光伏系统仍然需要向系统并网馈入电能,由负序分析可知,两变流器输出电流大小相同,在三相系统中电流对称,仿真结果如图 7 所示。



从图 7 可以看出,在供电臂处于空载的情况下,光伏并网电流三相电流对称,负序分量接近为 0,说明采用所提方法接入光伏不会引入新的负序分量,和理论分析相符合。

2) 仿真情况 2:两供电臂带载

假设 α 、 β 两相供电臂分别所带机车负载为 5 MW 和 8 MW,此时光伏系统电能 2 MW 需要完全馈入 α 相(重载臂)以改善不平衡电流,仿真结果如图 8 所示。

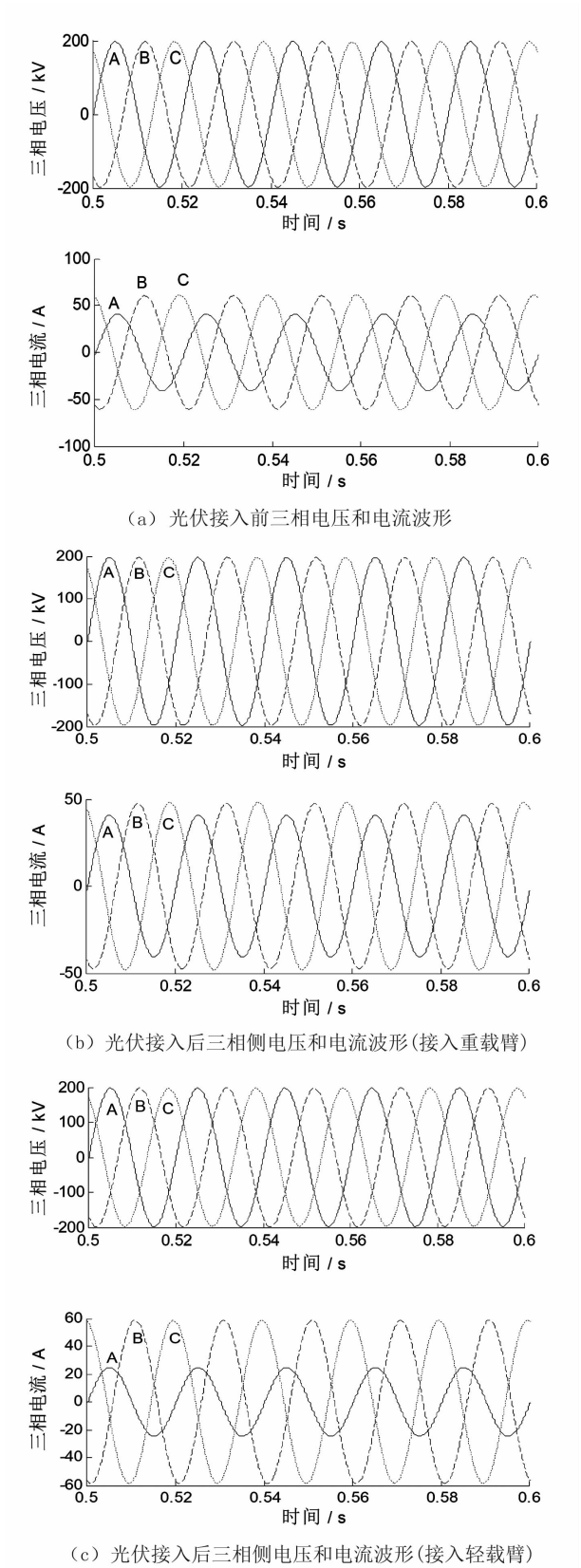


图 8 带载条件下仿真波形

从图 8 可以看出,光伏接入前三相电流不对称,合成负序功率为 3 MW,不平衡度为 23.07%。采用光伏接入重载臂后,合成负序功率为 1 MW,三相电流不平衡度降低为 9.09%。假设三相系统短路容

量为 2000 MVA,此时对应的三相不平衡电压近似为 0.05%。如果光伏电能接入轻载臂,合成负序功率为 5 MW,则三相电流不平衡度为 45.5%,此时对应的三相不平衡电压近似为 0.25%。显然采用光伏接入需要根据负荷情况合理分配并网供电臂,才能有效降低负序电流。

从以上两种情况仿真可知,仿真结果符合理论分析。说明采用所提方法在充分利用新能源的前提下,同时有助于改善牵引供电系统负序电流问题。

5 结 语

上面提出了一种考虑光伏接入的牵引供电系统负序改善方法,得出如下结论:

- 1) 针对牵引供电系统结构的特殊性,根据负荷电流差值情况,灵活选择光伏电能接入的供电臂,能够有效改善牵引供电系统负序电流问题;
- 2) 该方法可以拓展到光伏加储能接入、风力发电接入等其他类型的新能源接入方式;
- 3) 该方法同样可以拓展适用于三相-两相非平衡变压器结构牵引变压器(如 YN/d11 和 VX 牵引变压器)。

参考文献

[1] 于坤山,周胜军,王同勋,等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京:中国电力出版社,2011.

[2] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报,2014,49(4):559-568.

[3] 夏焰坤,李群湛,解绍锋. 电气化铁道贯通同相供电变电所控制策略研究[J]. 铁道学报,2014,36(8):25-31.

[4] 王辉,李群湛,解绍锋,等. 采用 YNd-SVG 的电气化铁路负序补偿模型及控制策略[J/OL]. 高电压技术,2021,57(5):1-12.

[5] 张宇,王辉,李群湛,等. 基于 Dd 匹配变和 SVG 的牵引变电所群贯通供电系统负序治理方案及控制策略[J]. 高电压技术,2021,47(1):150-158.

[6] 吴萍,李群湛. 基于 YN-vd 接线变压器的新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):87-92.

[7] Zeliang Shu, Shaofeng Xie, Qunzhan Li. Development and Implementation of A Prototype for Co-phase Traction Power Supply System[C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2010:1-4.

[8] Xiaoqiong He, Zeliang Shu, Xu Peng, et al. Advanced Co-phase Traction Power Supply System Based on Three-phase to Single-phase Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(10):5323-5333.

[9] An Luo, Chuanping Wu, John Shen, et al. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(10):2844-2856.

[10] Kengwen Lao, Ningyi Dai, Weigang Liu, et al. Hybrid Power Quality Compensator with Minimum DC Operation Voltage Design for High Speed Traction Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(4):2024-2036.

[11] 施大发,吴传平. 基于两相三线制变流器的高速铁路负序和谐波综合补偿新方法[J]. 电工技术学报,2012,27(7):257-264.

[12] 寇磊,罗安,吴传平. 基于两相三线制变流器的新型高铁电能质量补偿装置[J]. 电网技术,2013,37(1):224-229.

[13] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.

[14] 李群湛. 电气化铁道电能质量及其综合控制技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007.

[15] 解绍锋,方曼琪,戴朝华. 光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):53-59.

[16] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.

作者简介:

夏焰坤(1984),博士,副教授,研究方向为电力系统分析和电能质量分析与控制技术。(收稿日期:2020-03-25)

(上接第 61 页)

[2] 刘振亚,张启平,王雅婷,等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1015-1022.

[3] 李春华,黄伟雄,袁志昌,等. 南方电网±200 Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):116-121.

[4] 陆继志. STATCOM 在变电站的应用及意义[J]. 云南电业,2011(8):37-38.

作者简介:

邵沈会(1990),男,工程师,主要从事电力系统稳定分析、电力系统规划研究。

(收稿日期:2021-05-15)

浅谈水风光一体化在金沙江流域的典型应用

郭 飞¹,冯士睿¹,刘 强¹,胡剑波²

(1. 电力规划设计总院有限公司,北京 100120;2. 中国长江三峡集团公司,北京 100038)

摘 要:为实现“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取到 2060 年前实现碳中和”的目标,非化石能源消费在终端能源消费的占比中需不断提升。金沙江流域风光水资源丰富,具备一定的出力互补特征,依托存量及增量的大中型水电站的调节能力和送出通道,具备“风光水一体化”开发应用的基础和优势。结合金沙江流域的水风光特性和现状分析,对风光水多能互补的优势和应用的关键问题进行了探讨。

关键词:风电;光伏;水风光一体化;技术机理;多能互补

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0067-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210413

Discussion on Typical Application of Water-wind – photovoltaic Integration to Jinsha River Watershed

Guo Fei¹, Feng Shirui¹, Liu Qiang¹, Hu Jianbo²

(1. China Electrical Power Planning & Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;
2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract:In order to achieve the goal of "striving to reach the peak of carbon dioxide emissions by 2030, and striving to achieve carbon neutrality by 2060", the proportion of non-fossil energy consumption needs to achieve a continuous growth. The Jinsha River Basin is rich in water-wind-photovoltaic water resources who have complementary output characteristics. Relying on the adjusting abilities of large and medium-sized hydropower stations which are under construction or already in operation, the basin owns the foundation and advantages of the "water-wind-photovoltaic integration". Combined with its characteristics and the current research results of Jinsha River Basin, the superiority and a series of key issues in the development of multi-energy complementary are discussed.

Key words:wind power; photovoltaic generation; water-wind-photovoltaic integration; technology mechanism; multi-energy complementary

0 引 言

当前,中国经济发展进入新常态,能源行业发展态势发生深刻转变,为实现“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标,非化石能源消费在终端能源消费的占比中需不断提升。2021 年 2 月,国家发展改革委、国家能源局发布《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》(下称《指导意见》),提出“源网荷储一体化”“多能互补”的范畴与内涵,强

调统筹协调各类电源开发、提高清洁能源利用效率、适度配置储能设施、充分发挥负荷侧调节能力。

一般而言,多能互补有两种模式:1)面向终端用户电、热、冷、气等多种用能需求,优化布局建设一体化集成供能基础设施,实现多能协同供应和能源综合梯级利用;2)利用大型综合能源基地风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势,推进风光水火储多元化一体化开发。

近年来针对多能互补领域的应用研究也日渐深入。在园区级多能互补方面,国内外开展了大量研究。文献[1-2]针对园区内多种功能设备的互补

特性,提出了园区综合能源的典型应用方案。文献[3]结合江苏盐城某园区综合能源系统规划实例,对能源需求预测分析、能源站规划设计、多能互补协同效益等进行探讨了。在风光水储大型电源基地的多能互补领域,文献[4]针对风光水多能源电力系统,采用大数据和人工智能技术,提出基于随机规划的短期优化运行方法。文献[5]通过考虑水风光出力特性、负荷特性、机组调峰能力以及电网网络传输等约束,建立了清洁能源时序生产模拟模型。聚焦至金沙江流域,文献[6]重点研究了金沙江下游(四川侧)水电站、风光电站的出力特性与互补特性,论证了一体化开发的必要性。文献[7]以金沙江上游叶巴滩电站及其周边风光资源组成的风光水互补发电系统为例,研究互补送出能力的敏感性。

金沙江流域风光水资源丰富,具备一定的出力互补特征,依托存量及增量的大中型水电站的调节能力和送出通道,具备“风光水一体化”开发应用的基础和优势。下面将结合金沙江流域的研究成果,对多能互补发展暨风光水多能互补应用研究的一系列关键问题加以探讨。

1 金沙江流域风光水发展概况

1.1 水能资源

金沙江流域水能资源丰富,位于十三大水电基地之首。金沙江干流上游河段从青海玉树的巴塘河口至云南迪庆的奔子栏,河段全长 772 km,规划“一库 13 级”的总装机容量为 14 500 MW。其中,在青海与四川界河段布置了西绒、晒拉、果通 3 个梯级电站,规划装机容量为 840 MW;在四川与西藏界河段布置了岗托、岩比、波罗、叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、昌波 8 个梯级电站,规划装机容量为 9560 MW;在四川与云南界河段布置了旭龙、奔子栏 2 个梯级电站,规划装机容量为 4100 MW。配合水电消纳,规划建设金上直流 8000 MW 送电至华中。

金沙江干流下游河段自攀枝花到四川宜宾岷江河口,河段全长 782 km,干流上四大梯级水电站包括乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝,合计装机规模为 46 460 MW,电站调节能力强,配合水电消纳,已建成向上直流 6400 MW、溪浙直流 7200 MW,溪右至广东直流 6400 MW。在建乌东德直流 8000 MW,规

划建设白鹤滩 2 回直流合计 16 000 MW。

1.2 流域风光可开发资源

金沙江流域流经的省份主要包括四川、云南两省以及西藏自治区,依据风光资源普查结果,川滇两省区域内具有丰富的风光资源,西藏自治区内光伏资源条件优越。根据四川省地形、环流及光照特点,四川省风光资源主要集中在川西南地区的凉山州、攀枝花一带山地及川西高原地区。云南省风能资源主要集中在楚雄、大理、玉溪、红河以及曲靖等地,光伏资源主要集中在云南北部的金沙江河谷地区以及滇西、滇中部地区。西藏太阳能资源居全国首位,具有辐射量高、资源丰富地区面积大、太阳能资源稳定等特点,是进行太阳能发电最为理想的地区,太阳能资源很丰富及以上的区域面积占全自治区国土面积的 88%。

通过以上分析,金沙江上游流经的西藏昌都地区与川西高原是光伏资源条件优越的区域,中段以及下游流经的云南楚雄、大理、昆明、曲靖以及四川攀枝花、凉山彝族自治州均为风光资源丰富的地区。总体而言,金沙江流域水风光资源丰富,且水能资源与风光资源存在空间上的集中度,风光水多能互补开发的基础条件较为优越。

1.3 金沙江流域风光水消纳存在的问题

随着新能源装机比重的提高,新能源发展瓶颈逐步由开发侧制约转向系统消纳能力制约。在当前阶段,受到资源分布、送端网架、送受端电力市场需求等条件制约,金沙江流域风光水消纳主要面临送端系统网架薄弱、系统丰枯结构性矛盾突出、外送通道电力接续缺口凸显等问题。

1) 风光资源丰富地区主网架相对薄弱,通道建设困难。金沙江流域风光资源处川滇藏交界,资源较为丰富,但分布面积广且距离主网较远,单独开发将受送出条件限制。大规模新能源采用远距离线路汇集接入近区主网架,由于网架薄弱,存在风光大发时刻输电通道受阻、故障条件下风光低电压脱网、近区电网频率电压失稳等突出问题。

2) 川滇两省存在电力供需的结构性矛盾。川滇两省电力供需均具有以水为主、丰枯结构性矛盾突出的特点。从需求方面来看,丰枯比约 50%:50%;从供给方面来看,装机结构以水电为主,由于水电整体出力特性具有丰多枯少的特点,其中丰枯电量比约为

60%:40%,水电出力特性与负荷特性的不匹配造成了川滇两省容易出现“丰余枯缺”的结构性问题。

3)外送曲线需协调送、受、输三方诉求。“十四五”期间,随着三大流域后续水电开发,整体水电外送规模进一步扩大,叠加自身负荷的发展,四川省在“十四五”期间逐步发展至“丰枯均缺”,同时丰水期弃水问题并存的形势,云南省在“十四五”期间从全年富余逐步发展至基本平衡的态势。随着送端省份自身负荷的进一步发展,水电枯期的电力保供压力日益凸显。水电枯期的电量留存导致跨区域外送直流通道的利用率较低,电量缺口较大。以白鹤滩水电站为例,考虑枯期川滇两省的自用电量留存,不考虑丰期汇集网内富余水电,平水年直流通道利用小时约为3000 h。

2 多能互补发展及金沙江流域应用的优势

“多能互补”的开发模式,利用大型综合能源基地风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势,开展多元化、一体化的综合开发利用。《指导意见》强调利用存量常规电源,合理配置储能,统筹各类电源规划、建设、运营,优先发展新能源,积极实施存量“风光水(储)一体化”提升,稳妥推进增量“风光水(储)一体化”。金沙江流域水风光资源丰富,具备一体化开发的良好基础,亟需统筹规划、有序开发,创造良好消纳条件。

2.1 多能互补发展具备的多重互补优势

风光水(储)多能互补利用大型综合能源基地常规电源与新能源形成的资源组合优势,相比新能源分散接入、全网调峰的方式而言,大型综合能源基地多能互补具备多重互补优势。

1)多能互补助力品质升级。依靠常规电源以及储能的支撑调节能力,实现风储、光储、水储和风光储等联合发电运行方式自动组态、智能优化和平滑切换,有力平抑新能源波动,打造输出稳定、灵活可控的发电基地,为大规模新能源并网及调度提供技术支撑。

2)送受互补提升外送效率。与单独外送水电相比,新能源电量的增加将有效提高直流通道利用率,特别是枯期电量支撑,同时充分发挥水电调节能

力,兼顾送端留存电力电量需求与受端的保供需要,实现送受端的电力电量互补。

3)网源互补简化调度运行。以多能互补基地可调节电源(水电与储能)为核心,打捆近区范围内的随机电源(风电与光伏),实现一体化调度运行,实现基地整体稳定电力送出,降低调度运行的复杂程度。

4)存增互补调动市场活力。多种类型电源业主通过建立合理的利益分配机制,一方面可以利用新能源成本优势,提高目前开发成本相对较高的水电、气电、储能等调节电源的经济性;另一方面可以鼓励电源企业进一步深度参与调峰,释放电源调节空间,减轻送受端系统的调峰压力。

2.2 金沙江流域开展多能互补暨水风光多能互补应用的优势

1)水风光资源条件较优。依据四川省、云南省、西藏自治区的资源普查结果,区域内具有丰富的风光资源。初步预计金沙江上游光伏可开发规模约35 000 MW,下游风电、光伏可开发规模约15 000 MW,流域内风电光伏具备大规模开发和接入电网条件,具备建设国家级大型清洁能源综合基地的良好基础。

2)多能互补特性较好。从流域内水能、风能、太阳能的长期观测数据和风光水发电项目多年实际发电量,在年内资源量和出力过程上水能和风能、太阳能具有一定的互补性。利用水电(储能)的调节能力,通过风光水多能互补能够发挥多品类电源的综合效益。

3)电力市场空间充足。在“长江经济带”“长三角一体化”“粤港澳大湾区”等国家战略的持续引领下,江浙沪、广东地区电力需求预计仍将保持较快增长态势,“十四五”及中长期均存在较大的电力缺口,且受端省份电力盈亏控制月均以夏季为主,需求特性上较为匹配。

4)综合效益较优。风光水互补一体化开发能够利用金沙江流域众多水电站的调节性能,解决了风电、光电大规模集中开发的消纳难题。利用金沙江流域水能开发的资源优势,在“就近接入、就地消纳”新能源的基础上创新可再生能源综合开发模式,同时在满足国民经济性的基础上形成整体价格优势,具有良好的综合效益。

3 依托水风光多能互补技术机理优化综合能源基地规模研究

在水风光多能互补项目研究的过程中,在优先考虑送端需求、优先保障系统安全的前提下,以受端市场空间、受端消纳能力和送端资源特性为导向,深入研究水风光多能互补应用的技术机理,优化综合能源基地外送规模。

3.1 水风光多能互补资源侧互补特性

从年内互补特性来看,以金沙江下游为例,6 月至 10 月为丰水期,来水量大、发电量多,12 月至次年 4 月为枯水期,来水量小、发电量少;风电 11 月至 12 月、1 月至 2 月平均出力较高,出力系数超过 0.5,6 月至 9 月平均出力较低,出力系数仅为 0.1 至 0.2;光伏全年月平均出力相对平稳,2 月至 4 月较高,6 月至 8 月较低。风电和光伏发电均与水电站出力特性呈现较好的年内互补性。

从日内互补特性来看,金沙江上游岗托等 7 级电站,下游乌东德、白鹤滩以及溪洛渡等水电站均具有一定调节库容,可进行日内或以上调节。实现风光水多能互补运行,利用水电的调节作用,在风光大发时段通过加大水库蓄水降低水电出力,用风光电量“置换”水电电量,在风光少发时段,通过释放水库水量抬高水电工作位置,因此,风光水日内互补是一个“此消彼涨”的过程,互补后系统整体出力趋于平滑稳定。

3.2 多能互补系统优化技术机理

水风光配比是系统性优化问题,需要从送端、直流、受端三个方面与电源和电网两个维度,结合技术经济分析进行分析,优化风光水容量配比和送电曲线。

风光水多能互补的总体优化目标,是在满足可再生能源合理利用水平基础上,投资满足一定收益率的情况下,国民经济性达到最优。国民经济性可以采用系统总发电成本加以表征,投资收益应包含多能互补各方主体的总体成本及收入(包括辅助服务等市场收益)。总体约束主要考虑系统平衡和电站运行两类约束条件。系统平衡约束主要包含电力电量平衡、调峰平衡、线路最大输送功率约束;电站运行约束主要包括发电出力上下限、水库流量、发电量平衡约束。整体优化包括送电曲线和电源配比两

个优化子项,需结合送端、直流通道以及受端的边界条件,在送端保证清洁能源的可靠消纳、受端满足电力保障与调峰要求、通道保持较高利用率水平的目标下,进行反复迭代优化。

4 实现风光水多能互补的关键环节

多能互补发展作为保障能源安全、提升能源清洁利用水平和电力系统运行效率的关键路径,在项目推进过程中需要重点把握电源配比、送受端市场空间与负荷特性、外送曲线以及项目经济性效益,保障多能互补项目能够真正“落得下,调得稳,送得出”。

4.1 多能互补基地电源配比及消纳分析

以水电作为支撑和调节电源的外送基地,具备 100% 可再生能源电量比例,需要充分利用水电调节特性,以最大化利用清洁能源为目标,统筹水电与风光电源的利用,兼顾送端电源利用效益以及受端对非水可再生能源电力的消纳责任权重,控制水风光的综合利用率在合理水平。因此,优化电源配比和促进新能源开发及消纳是实现风光水一体化多能互补的首要任务,需要结合多种能源出力特性,建立多能互补优化模型,确定多能互补综合能源基地的最优电源配比。电源配比与送端电源出力特性、外送电力曲线、送受端系统调峰压力等息息相关,需反复迭代优化。水电作为限能电站,受天然来水情况及库容影响,丰水期水量充沛、发电能力强;调节能力差;枯水期水量少、发电能力差、调节能力强。与光伏、风电多能互补优化后,调峰弃电主要发生在丰水期风光大发时段。

经初步测算,依托金沙江干流梯级大水电跨省(区)外送消纳,通过水风光一体化的多能互补方式,可就近开发的新能源规模预计超过 50 000 MW。其中,金沙江上游梯级水电配套 4000 ~ 8000 MW 光伏,白鹤滩水电站配套 10 000 ~ 15 000 MW 光伏,送端电源综合利用率可达 95%。在具体项目遴选过程中,应充分考虑水电近区风光资源,有效衔接各类电源建设进度,集中开发、就近互补、统一汇集,充分发挥规模化开发优势。

4.2 外送通道送电曲线优化

对于外送消纳的电源基地,外送通道是实现送受端统筹协调的桥梁,合理拟定送电曲线对于实现

高质量多能互补至关重要。首先,结合送端电源特性及受端市场需求,框定通道合理利用小时数,保持通道较高利用水平,确保投资成本回收,通道利用小时数不宜过高或过低;其次,分情景拟定年送电曲线,兼顾配套水光打捆后的月际间电量分布特点与受端年负荷特性及供电需求,尽可能实现清洁能源充分消纳,枯期不弃电,丰期少弃水;再次,拟定典型日送电曲线,充分发挥流域梯级水电调节能力,合理安排送电高峰时段送电功率及时长,既满足受端电力供应保障,发挥良好的替代效益,又不增加送受端系统调峰压力,不造成新能源消纳的压力转移。以金沙江上游为例,结合梯级水电建设时序分阶段研究送电曲线,在考虑枯期一定比例留存满足送端供需基础上,通道利用小时在 5500 左右及以上,丰、枯期外送电量比约为 7:3~6:4,为兼顾受端供电及调峰需求,丰期日峰谷比约为 1:0.9~1:1,枯期约为 1:0.2~1:0.3。

未来,在送受端开展中长期电力交易基础上,随着电网运行等技术进步以及现货市场发展等,开展电源出力超短期预测滚动修正送电曲线。

4.3 经济性测算及投资效益分析

电源基地外送消纳需满足国民经济行和财务可行性的双重需求。水电站不同于其他类型电源,受流域分布影响难以改变布局,随着水电开发难度增加导致成本不断提升,将本地难以有效消纳的清洁水电送至综合购电成本更高且相对资源有限的中东部地区,从国家宏观利益出发,符合对国家有限资源的合理配置。与此同时,西部、西南地区新能源开发成本要低于中东部地区,且随着光伏组件、风电主要设备以及储能设备价格的不断下降,风电、光伏发电的平准化电价 (levelized cost of energy, LCOE) 已低于水电平均度电成本,因此,水风光多能互补对于提升电源开发整体财务可行性是一种良性增益。

以金沙江上游外送为例,梯级水电平均度电成本约 0.405 元/kWh,近区光伏 LCOE 理论水平约 0.26 元/kWh,输电总成本约 0.1 元/kWh,与华中地区 0.38~0.45 元/kWh 的基准电价相比,仅依托水电将形成电价倒挂,而水光多能互补送出有利于提高电价竞争力的同时满足送端电源整体的财务可行。未来,随着社会经济发展、电力市场逐步完

善、环保要求不断提高,全比例清洁能源、高比例新能源外送的跨省区输电通道预计将在电力市场配置中发挥更大的作用。

5 结 语

基于国家发展改革委、国家能源局下发的《指导意见》,结合金沙江流域的水风光特性与现状分析,对金沙江流域开展多能互补的优势、关键环节和重点环节进行了分析。针对金沙江流域的水风光一体化应用,现阶段应该加强多能互补规划、建设实施、运行调节和管理规范多方面的统筹协调,同时在全国电力格局的范畴内统筹送端水电留存和外送规模。考虑到新能源开发建设的不确定性,需要配套受端电网主网架的建设进度,滚动优化金沙江流域的电源配比方案。

参考文献

[1] 李桂鑫,王哲,姚俊韬,等. 基于多能互补特性的园区综合能源典型方案研究[J]. 通信电源技术,2020,37(2):74-75.

[2] 张伟波,谢玉荣,杨帆,等. 多能互补分布式综合供能系统及典型开发方案研究[J]. 发电技术,2020,41(3):246-251.

[3] 渠敬涛. 基于多能互补的综合能源系统规划案例分析[J]. 电工技术,2020(2):43-46.

[4] 胡伟,戚宇辰,张鸿轩,等. 风光水多能源电力系统互补智能优化运行策略[J]. 发电技术,2020,41(1):9-18.

[5] 戚永志,黄越辉,王伟胜,等. 高比例清洁能源下水风光消纳能力分析方法研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(1):55-63.

[6] 李良县,李宁. 金沙江下游(四川侧)水风光互补开发研究初探[J]. 水电站设计,2019,35(3):74-79.

[7] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 水风光互补发电系统送出能力分析[J]. 水电站设计,2018,44(12):100-104.

作者简介:

郭飞(1987),硕士,高级工程师,主要从事电力系统分析及电力规划研究。

某大型水电站高压厂用变压器及励磁变压器 温度过高跳闸回路优化

李 超,王文松,杨代翠,李 成
(雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051)

摘 要:某大型水电站高压厂用变压器和励磁变压器温度过高动作于跳闸,跳闸回路的可靠性直接关系到机组的安全稳定运行。随着自动化元件长时间投入运行,温控箱和测温探头出现故障频率增加,由于温度过高跳闸回路存在设计不合理的问题,这些自动化元件的故障可能导致误出口,直接造成机组非计划停运事故。通过分析原跳闸回路存在的问题,提出两种回路优化方案,对比两种方案优缺点,选择适合电站的方案。

关键词:高压厂用变压器;励磁变压器;温度过高;回路优化;误开出

中图分类号:TV 734 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2021)04-0072-03

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210414

Circuit Optimization for Tripping Cause by High Temperature of HV Auxiliary Transformer and Excitation Transformer in A Large Hydropower Station

Li Chao, Wang Wensong, Yang Daicui, Li Cheng
(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract: HV auxiliary transformer and excitation transformer in a large hydropower station are tripping because of high temperature, and the reliability of tripping circuit is directly related to the safe and stable operation of the unit. As the automatic components are put into operation for a long time, the failure frequency of the temperature control box and temperature probe increases. Due to the unreasonable design in the tripping circuit due to high temperature, the failure of these automatic components may lead to the wrong exit and directly cause non-stop accident of the unit. By analyzing the existing problems of the original tripping circuit, two optimization schemes for the circuit are proposed, the advantages and disadvantages of these two schemes are compared, and the suitable scheme for the hydropower station is given.

Key words: high temperature; circuit optimization; incorrect trip

0 引 言

某大型水电站(以下简称 A 水电站)高压厂用变压器(以下简称高厂变)和励磁变压器(以下简称励磁变)均为干式变压器,根据水电站继电时设计规范,高厂变和励磁变温度过高时要求投跳闸。A 水电站的高厂变温度过高保护动作结果:跳高厂变低压侧断路器,跳发电机出口断路器,跳主变压器高压侧 500 kV 断路器。励磁变温度过高保护动作结果:停机,跳灭磁开关,跳发电机出口断路器。A 水电站的高厂变和励磁变温度过高跳闸回路的可靠

性,会直接影响该水电站的机组安全稳定运行以及对电网的可靠供电。

A 水电站的高厂变和励磁变温度过高保护通过开入到非电量保护装置实现跳闸功能,开入的接点来自于温控箱的逻辑判断开出,温控箱的温度采集通过测温探头来实现,如果温控箱或者测温探头出现故障,就可能温度过高保护误开出。在实际检修维护中,A 水电站温控箱故障和测温探头异常的缺陷出现过很多次,虽然没有动作出口,但已经严重威胁和影响了机组的安全运行。为了防止高厂变和励磁变温度过高保护误开出,需要针对其跳闸回路进行优化。

1 原跳闸回路问题分析

1.1 原跳闸回路

图1为A水电站高厂变和励磁变的温度过高跳闸开入原理图,温度过高接点和温度高接点串接后开入到非电量保护装置,只有温度高和温度过高同时满足,非电量保护装置才能收到开入令,然后开出接点动作于断路器跳闸^[1]。

温度高接点和温度过高接点由温控箱开出,高厂变和励磁变温控箱接入一组(两个)测温探头,两个测温通道,探头分别插入两个绕组筒内。当任何一个通道温度达到130℃高报警值时,温控箱温度高接点闭合,当温度继续升高到150℃过高时,温度过高接点闭合。A水电站高厂变和励磁变每相均有4个测温探头,两个送给温控箱使用;另两个送给监控使用,用于上位机监视变压器温度,一个主用,一个备用。

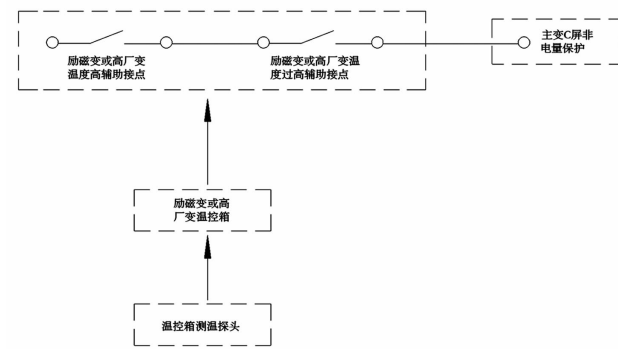


图1 高厂变、励磁变温度过高跳闸原理

1.2 问题分析

图2为高厂变、励磁变温度过高跳闸原理解析图。如图2所示,参与原跳闸回路控制的自动元件都为单一配置,会存在以下问题:

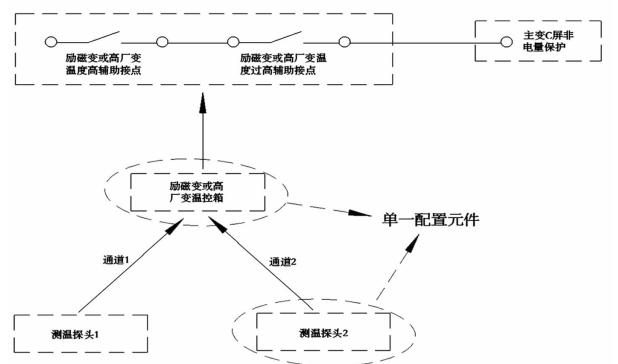


图2 高厂变、励磁变温度过高跳闸原理解析

1)温控箱有两个测温通道,每一个测温通道都对应一个测温探头,这两个测温探头彼此独立,没有对比互锁,任何一个测量温度达到高和过高定值,温控箱都会开出闭合相应的接点。若测温探头出现异

常,阻值逐渐增大,温控箱测量温度逐渐达到过高定值,会导致温控箱逻辑误判,节点闭合误开出。

2)温度高和过高输出接点都由温控箱开出,温控箱控制板件出现故障,如接点粘连,也会导致保护误开出。

1.3 案例分析

在2019年6月,A水电站2号机组在并网运行时出现过一次异常报警,报警现象如下:

上位机:2号机组主变压器C套非电量保护装置报警、2号机组主变压器C套励磁绕组温度高报警。

现地:2号机组主变压器保护C柜励磁温度高报警,励磁变A相温控箱a通道温度显示100.5℃,b通道显示135℃,有上升趋势;B相和C相温控箱两个通道显示均为100℃左右。

处理经过:检修人员用红外测温仪测量2号励磁变温度,A、B、C三相温度平衡,一次设备无异常温度高现象,判断为A相温控箱b通道测温回路存在异常。为了防止励磁变温度过高误开出,运行人员申请退出了非电量保护柜上励磁温度过高启动跳闸功能压板。2号机组停机后,对励磁变A相温控箱b通道的测温探头进行校验,检验不合格,测温探头故障;重新更换了b通道的测温探头,试投运观察,b测温通道显示正常。

从案例可以看出,A水电站的高厂变和励磁变温度过高跳闸回路可靠性不高,不能有效闭锁单一测量元件造成的故障问题,如果处理不及时或未正确处理,可能出现机组非计划停运的严重事故。

2 回路优化方案

针对高厂变和励磁变温度过高跳闸回路存在的问题,提出了两个优化方案。

方案1:优化后高厂变、励磁变温度过程跳闸原理如图3所示。在高厂变和励磁变的跳闸开入回路中增加机组测温现地控制单元的温度过高信号闭锁接点,即温控箱保护测温 and 监控测温同时满足温度过高条件时,才会跳闸出口。

方案2:联系厂家升级改造温控箱,新温控箱使用双通道4个测温探头,即每个通道有两个测温探头^[2],同时优化温控箱控制逻辑。优化逻辑要求如下:

温控箱双通道4个采集温度分别为a1、a2和b1、b2。

1)当a1和a2(或b1和b2)温度偏差大于定值(定值可调)时,则报“装置故障报警”,闭锁通道的

温度高报警、温度过高跳闸。

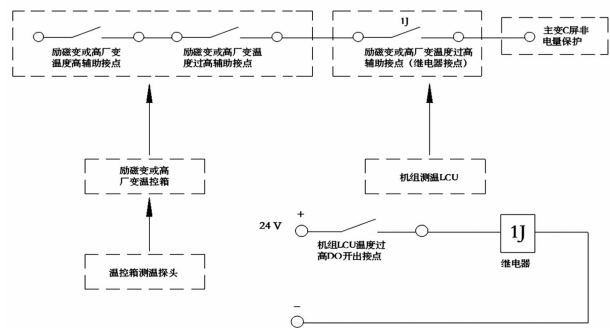


图 3 优化后高厂变、励磁变温度过高跳闸原理

2) a1 和 a2(或 b1 和 b2) 的温度偏差小于定值时: a1 和 a2(或 b1 和 b2) 测量温度同时到达温度高报警定值时, 温度高报警接点开出; a1 和 a2(或 b1 和 b2) 测量温度同时到达温度过高跳闸定值时, 温度过高跳闸接点开出。

3 方案选择

两个方案都能提高高厂变和励磁变温度过高跳闸回路的可靠性, 将从经济性、施工难度、作业风险、可靠性 4 个方面进行量化对比, 对比结果详见表 1。

表 1 方案量化对比

方案	经济性	施工难度	作业风险	可靠性
方案 1	1) 登高作业数 新增电缆 和继电器 费用 1600 元	2) 安装继电器 3) 修改现地控制单元程序和数据库	1) 登高风险 2) 程序误修改风险	1) 保护和监控用测温探头同时满足温度过高 2) PLC 和温控箱输出接点同时闭合
方案 2	更换温控箱和增加测温探头 费用 11 000 元	更换温控箱和敷设新增测温探头	无	1) 每个通道两个测温探头, 同时满足温度过高 2) 温控箱接点输出节点闭合
对比结果	方案 1 成本更低	方案 2 施工难度小	方案 2 作业风险低	方案 1 可靠性更高

从表 1 对比结果, 可以得出两个方案的优缺点。

方案 1 优点: 优化改造成本低, 充分利用现场布置的测温探头, 不用新增加, 将保护用和监控用的测温探头作为对比, 实现温度过高跳闸回路的相互闭锁, 逻辑判断和接点输出的元件包含温控箱和可编程逻辑控制模块(PLC), 跳闸回路更加先进可靠。缺点: 现场施工较复杂, 作业风险较高, 需要登高作业新敷设一条电缆, 在测温屏中增加中间继电器; 另外, 还需要修改监控程序和数据库, 需协调保护班和

监控班两个班组共同完成。

方案 2 优点: 回路改动少, 风险小, 联系厂家升级温控箱, 只需更换温控箱和增加 2 个测温探头, 现场施工方便。缺点: 需要更换所有高厂变和励磁变温控箱, 改造成本较高, 因为变压器每相增加了两个测温探头, 温控箱需要巡回显示 4 个温度值, 运行巡检、检修维护工作量和难度增加; 另外, 跳闸回路的温度高和过高接点由单一的温控箱输出, 温控箱故障, 比如接点粘连等异常问题, 仍可能导致温度过高保护误开出。

A 水电站是国调直属管辖电站, 设备的安全可靠运行必须优先考虑。优化后的温度过高跳闸回路更加安全可靠, 该方案的实施可以结合机组检修开展, 设备停电时间充足, 可以有效保证回路优化作业的质量和安全。综上考虑, A 水电站选择方案 2。

4 结 语

在 2019—2020 年度检修期, A 水电站完成了所有高厂变和励磁变跳闸回路的优化工作, 试验结果正确, 投运正常。2020 年 6 月, 2 号机组励磁变 A 相 a 通道保护用测温探头出现故障, 温度持续上升到 150 ℃, 温控箱跳闸灯点亮, 由于监控测温探头正常, 正确闭锁了励磁变温度过高跳闸出口, 保障了 2 号机组的安全稳定运行。

A 水电站高厂变和励磁变温度过高跳闸回路的优化, 能够有效提高设备的安全可靠水平, 其优化原理简单可靠, 不用升级设备和新增自动化监视元件, 容易实现。A 水电站高厂变和励磁变温度过高跳闸回路的优化方案可为其他水电站解决类似问题提供参考思路和经验。

参考文献

[1] RCS-974FG 型变压器非电量及辅助保护装置技术说明书[M]. 南京: 南京南瑞继保电气有限公司, 2007.
[2] 于潇, 祁亚静, 赵浩, 等. 一种励磁变压器温度控制器改造经验简析[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(12): 27-29.

作者简介

李 超(1987), 男, 工程师, 主要从事水电站检修维护工作。

LOCKOUT 继电器在特高压直流工程 二次回路中的应用研究

陈 鹏¹, 尹 刚¹, 郭力驰², 邹荣盛¹, 许 斌¹
(1. 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430072;
2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要:由于巴西当地电网运行维护习惯不同,巴西美丽山二期±800 kV 特高压直流工程交流系统二次回路中的 LOCKOUT 继电器与中国工程的应用和配置原则存在较大的差别。详细分析和比较了巴西与中国特高压换流站交流系统典型的断路器操作回路的差异性,提出了适用于巴西当地电网运行维护要求的特高压换流站交流系统二次回路中 LOCKOUT 继电器的配置原则。并以欣古换流站交流滤波器小组断路器的操作回路为例,详细介绍了 LOCKOUT 继电器的启动和闭锁逻辑。所提出的 LOCKOUT 继电器的配置原则有利于更好地适应巴西当地的电网建设,为特高压直流输电技术走出国门、服务世界提供了强有力的技术支撑。

关键词:LOCKOUT 继电器;巴西美丽山二期±800 kV 特高压直流工程;断路器操作箱;二次回路设计

中图分类号:TM 77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0075-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210415

Application and Research of LOCKOUT Relay Used in Secondary Circuit of UHVDC Project

Chen Peng¹, Yin Gang¹, Guo Lichi², Zou Rongsheng¹, Xu Bin¹
(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Whuhan 430072, Hubei, China;
2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract:Due to the different operation and maintenance habits of power grid in Brazil, the LOCKOUT relay used in circuit-breaker secondary circuit of Belo Mountain II ±800 kV UHVDC project is different from its application and configuration principles of power grid in China. The differences between Brazil and China about the typical circuit-breaker operation circuit in AC system of UHVDC project are analyzed and compared. Then, the configuration principle for LOCKOUT relay of the circuit-breaker operation circuit in AC system of UHVDC project is put forward, which can meet the operation and maintenance requirements in Brazil. Moreover, taking the circuit-breaker operation circuit in Xingu converter station for example, the start-up and locking logic of LOCKOUT relay are introduced in detail. The proposed configuration principle for LOCKOUT relay is adapted to the construction of power grid in Brazil, and provides a support for the Chinese UHVDC technology to go abroad and service the "Belt and Road" countries.

Key words:LOCKOUT relay; Belo Mountain II ±800 kV UHVDC project; circuit-breaker operation interface equipment; secondary circuit design

0 引 言

巴西美丽山二期±800 kV 特高压直流工程(以下简称“巴西美二工程”)是中国第一个特高压直流

输电技术、设计、装备、建设、运行维护全产业链“走出去”的电网工程,是中国在巴西乃至拉美地区推进“一带一路”倡议、构建全球能源互联网的重要实践,对实现中国特高压直流输电标准、技术和装备“走出去”具有重要战略意义^[1-2]。

由于巴西当地电网的运行维护习惯与国内电网不同,巴西美二工程换流站交流系统的二次回路设计理念存在较大的差别。LOCKOUT 继电器(86)因其具有接点容量大、锁定保持等特点^[3],广泛应用于巴西 500 kV 交流断路器的操作回路中,且断路器的操作回路需根据与其相关的交流保护功能要求进行单独设计。而国内特高压直流输电工程交流系统断路器通常采用标准化和集约化的操作箱或继电器箱实现不同的交流保护功能要求^[4-5]。因此,国内成熟的特高压换流站二次系统设计经验不能完全满足巴西当地电网运行维护的要求。

为适应巴西美二工程换流站交流系统的二次回路设计理念,满足巴西当地电网运行维护要求,对巴西与国内特高压换流站交流系统典型的断路器操作回路进行了差异性分析,提出了适用于巴西当地电网运行维护要求的特高压换流站交流系统二次回路中 LOCKOUT 继电器的配置原则。并以巴西美二工程中具体的断路器操作回路为例,详细介绍了 LOCKOUT 继电器的启动和闭锁逻辑。所提出的 LOCKOUT 继电器的配置原则有利于更好地适应巴西当地的电网建设,为特高压直流输电技术走出国门、服务世界提供了强有力的技术支撑。

1 国内与巴西美二工程交流断路器操作回路差异性分析

国内特高压直流换流站的 500 kV 及以上交流系统主要包括交流串、交流滤波器、变压器、高压电抗器等设备。500 kV 及以上交流系统保护主要包括:线路保护、母线差动保护、断路器失灵保护以及变压器和高压电抗器等元件保护。交流滤波器保护虽然是属于直流系统保护的一部分,但其保护配置和出口回路设计与交流系统保护类似。以上交流保护除了断路器失灵保护为单套配置外,其他的保护均为双重化配置,且全站计算机监控系统的测控装置为双重化配置^[6-8]。

巴西美二工程的 500 kV 交流系统保护配置与国内特高压直流换流站的配置基本相同,但是其交流断路器操作回路的设计与国内特高压直流换流站的设计存在较大的差异。特高压直流换流站交流断路器操作回路通常有操作箱和出口继电器两种方式,接下来将对两种方式下的断路器操作回路进行分析。

1.1 采用操作箱方式

国内特高压直流换流站 500 kV 及以上交流系统保护的出口回路通常采用配置分相操作箱的方式^[9-10]。分相操作箱主要包含 2 组分相跳闸回路和 1 组分相合闸回路,操作箱集成跳闸/合闸保持、跳位/合位监视、防跳回路、三相不一致保护、手动合闸/分闸、重合闸、等功能。以国内某特高直流换流站 500 kV 交流断路器操作回路为例,双重化配置的保护中任意一套保护动作后,根据保护装置判断结果启动断路器操作箱对应功能的跳闸继电器(TJR:启动失灵不启动重合闸;TJQ:启动失灵启动重合闸;TJF:不启动失灵不启动重合闸)。并将对应功能的跳闸继电器的节点接入交流断路器机构箱内的跳闸回路,实现保护跳闸的功能,如图 1 所示。

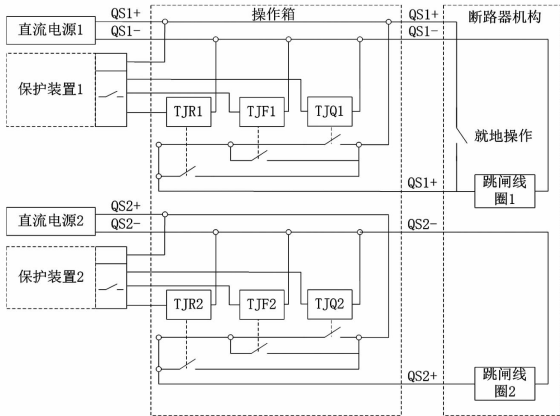


图 1 采用操作箱的断路器操作回路

1.2 采用出口继电器方式

1) LOCKOUT 继电器用于跳闸保持

国内某区域电网要求 500 kV 及以上交流断路器操作回路不直接利用操作箱中的 TJR、TJQ、TJF 继电器来实现断路器失灵保护和重合闸功能是否启动,而是通过采用单独的出口继电器实现断路器失灵保护启动、重合闸功能的闭锁和启动功能。同时,在断路器的跳闸回路中并接 LOCKOUT 继电器的常开接点,如图 2 所示。

图 2 示意了第一套断路器跳闸回路。第二套断路器跳闸回路与第一套线圈回路的原理相同,且第二套断路器跳闸回路和第一套断路器跳闸回路不共用 LOCKOUT 继电器,LOCKOUT 继电器的动作逻辑如下:

(1)正常情况下,LOCKOUT 继电器的线圈不带电,且接在断路器跳闸回路的 LOCKOUT 继电器节点断开;

(2)当失灵保护动作要求跳本断路器或其他断路器失灵保护动作要求联跳本断路器时,LOCKOUT 继电器的线圈带电,且接在断路器跳闸回路的 LOCKOUT 继电器节点闭合,本断路器跳闸,且一直保持断路器跳闸线圈带电,直到人为对 LOCKOUT 继电器进行复归(远方手动或就地手动),本断路器跳闸保持才取消,如图 2 所示。

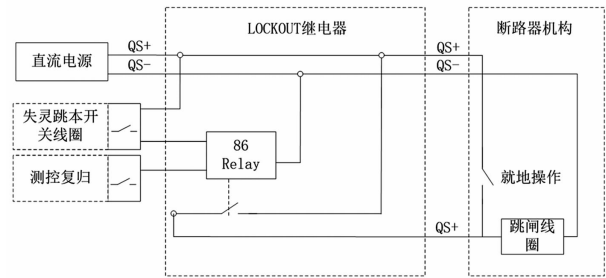


图 2 LOCKOUT 继电器用于跳闸保持回路

2)LOCKOUT 继电器用于合闸闭锁

巴西美二工程的 500 kV 交流断路器的操作回路与国内工程不同,其操作回路不设置统一的操作箱,而是针对每个断路器间隔,根据交流保护的動作结果单独设置断路器操作回路。并在直接出口跳闸本断路器的保护装置中设置 LOCKOUT 继电器,并将 LOCKOUT 继电器的常闭接点串接在断路器的合闸回路中,如图 3 所示。

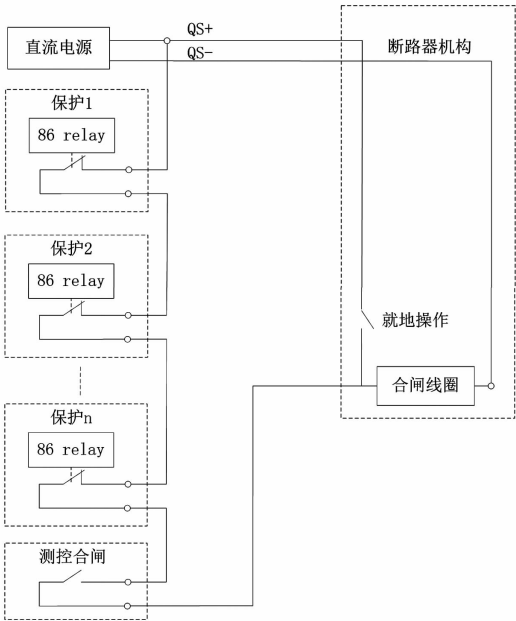


图 3 LOCKOUT 继电器用于合闸闭锁回路示意

图 3 为断路器合闸闭锁回路示意图,其中,保护 1、保护 2、...,保护 n 为直接出口跳闸本断路器的保护,且双重化配置的保护装置共用 1 个 LOCKOUT

继电器,LOCKOUT 继电器的动作逻辑如下:

(1)正常情况下,保护装置中的 LOCKOUT 继电器不带电,常闭接点闭合,测控装置可直接对断路器进行合闸操作。

(2)某保护动作后,保护出口跳开断路器,并同时启动 LOCKOUT 继电器,LOCKOUT 继电器的常闭接点断开,即对断路器的合闸回路进行闭锁。此时,无论保护装置是否复归,断路器都不能进行合闸操作,直到人为对动作后的保护装置中的 LOCKOUT 继电器进行复归(远方手动或就地手动),才能解除闭锁,对断路器进行合闸操作。

2 适用于巴西美二工程的 LOCKOUT 继电器的配置原则

在巴西美二工程中,LOCKOUT 继电器用于闭锁断路器合闸回路,不因保护装置复归而解除合闸回路闭锁,有利于断路器合闸回路闭锁的持续性,能够有效地避免保护动作后断路器合闸的误操作,对提高特高压直流输电工程的可靠性和运维人员的安全性具有积极作用,该设计方案在巴西美二工程中得到了广泛应用。但是 LOCKOUT 继电器的配置增加了断路器操作回路的复杂程度,不利于交流系统二次回路的设计标准化和功能集成化,且 LOCKOUT 继电器的配置原则与交流系统保护的動作逻辑关系密切,因此,亟需提出符合巴西当地运行习惯的 LOCKOUT 继电器的配置原则,为后续直流工程设计提供有利的技术支撑。针对巴西美二工程中 LOCKOUT 继电器的配置情况,提出了适用于该工程的 LOCKOUT 继电器的配置原则,主要包括:

1)除线路保护之外的双重化的保护(如母差保护、变压器保护、断路器失灵保护等)共用 1 个 LOCKOUT 继电器,且 LOCKOUT 继电器配置在第一套保护屏内,任意一套保护动作均可启动对应的 LOCKOUT 继电器;且与本断路器跳闸相关的保护对应的 LOCKOUT 继电器,其常闭接点均需要串接入本断路器的合闸回路中。

2)变压器保护、高压电抗器保护、滤波器保护和断路器失灵保护等保护动作启动其对应的 LOCKOUT 继电器。为保护设备免受故障电流冲击造成事故扩大,变压器保护、高压电抗器保护、滤波器保护和断路器失灵保护等保护动作后均不需要进

行重合闸操作,因此,在上述保护的出口回路均配置 LOCKOUT 继电器,闭锁跳闸后断路器的合闸回路。

3)母差保护动作跳闸和断路器失灵联跳母差保护不共用 LOCKOUT 继电器。500 kV 交流系统母差保护动作的原因有两种:一是交流母线发生短路故障,母差保护动作跳开母线上的所有断路器;二是断路器失灵保护动作,为及时隔离故障,联动母差保护,跳开母线上的所有断路器。在巴西美二工程中,母差保护提供 2 个出口,分别为母线故障的保护动作出口和失灵联跳的保护动作出口,2 个出口不共用 LOCKOUT 继电器,母差保护装置根据保护动作的判据分别启动不同的 LOCKOUT 继电器,对所有跳开的断路器进行合闸回路闭锁,如图 4 所示。

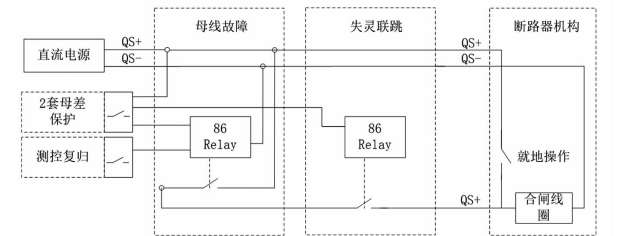


图 4 母差保护启动 LOCKOUT 继电器

4)线路保护不配置 LOCKOUT 继电器,线路保护集成远跳功能需启动 LOCKOUT 继电器。为防止瞬时性故障造成输电线路跳闸停运,线路保护跳闸后需启动断路器重合闸装置,故线路保护不配置 LOCKOUT 继电器。但巴西美二工程的 500 kV 线路保护集成了远跳线路对侧断路器的功能,通常情况下本侧交流母线发生故障或断路器失灵时,母差保护动作虽切除本侧断路器,但故障依然没有切除,且故障不在线路保护范围内,此时需通过远跳功能瞬时跳开对侧断路器,并闭锁对侧断路器合闸,达到彻底切除故障的目的。

3 LOCKOUT 继电器在巴西美二工程中的应用

欣古换流站是巴西美二工程送端换流站。欣古换流站 500 kV 交流系统采用 3/2 接线方式,本期 1 回出线、2 回换流变压器进线和 3 回交流滤波器大组出线,共 6 组进出线,组成 3 个完整串;交流滤波器大组母线采用单母线接线方式,3 回小组滤波器进线,1 回大组滤波器出线接入 500 kV 交流串中。欣古换流站 500 kV 交流系统电气主接线如图 5 所示。

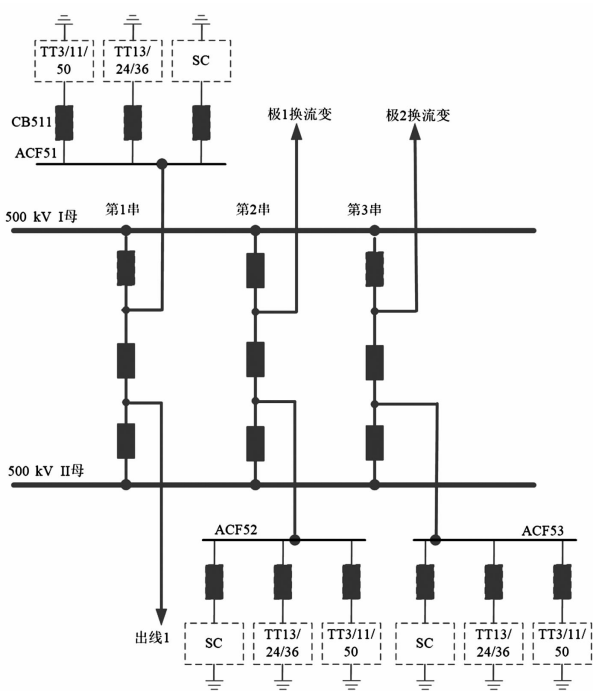


图 5 欣古换流站 500 kV 交流系统电气主接线

由于巴西美二工程的每个断路器操作回路需要对与该断路器相关的交流保护的功能要求进行单独设计,且 LOCKOUT 继电器与交流保护的動作特性密切相关。为详细分析巴西美二工程交流断路器操作回路的设计特点,以欣古换流站 500 kV 交流滤波器小组断路器的合闸回路为例,对 LOCKOUT 继电器在巴西美二工程中的应用进行详细说明。

在图 5 中,CB511 为 500 kV 第一大组交流滤波器 TT3/11/50 小组的并网断路器,由欣古换流站的交流保护配置可知,与 CB511 断路器出口跳闸相关的保护装置主要包括 ACF51 交流滤波器大组保护装置、交流滤波器 TT3/11/50 小组保护装置、CB511 本身的断路器失灵保护装置,且交流滤波器大组保护和交流滤波器小组保护双重化配置,断路器失灵保护单套配置。

交流滤波器大组保护的 LOCKOUT 继电器布置在交流滤波器大组保护屏 1 中,交流滤波器大组保护 2 与交流滤波器大组保护 1 共用 1 个 LOCKOUT 继电器;TT3/11/50 小组保护的 LOCKOUT 继电器布置在 TT3/11/50 小组保护保护屏 1 中,TT3/11/50 小组保护 2 与 TT3/11/50 小组保护 1 共用 1 个 LOCKOUT 继电器;CB511 本身的断路器失灵保护配置 1 个 LOCKOUT 继电器。上述 LOCKOUT 继电器的常闭节点均串接在断路器合闸回路中,用于闭锁该断路器合闸回路,并考虑到交流滤波器小组断路

器配置选相合闸装置,CB511 的断路器合闸回路具体接线如图 6 所示。

图 6 中,正常情况下,可通过测控装置对 CB511 断路器进行合闸操作;当发生故障时,交流滤波器大组保护、TT3/11/50 小组保护或断路器失灵保护中任意保护动作,跳开 CB511 断路器,同时保护动作均启动其对应的 LOCKOUT 继电器,对应合闸回路中 LOCKOUT 继电器的常闭接点断开,对断路器合闸回路进行闭锁保持。此时,无法通过测控装置对断路器进行合闸操作,直到通过测控对动作的 LOCKOUT 继电器进行复归操作,断路器才能合闸。

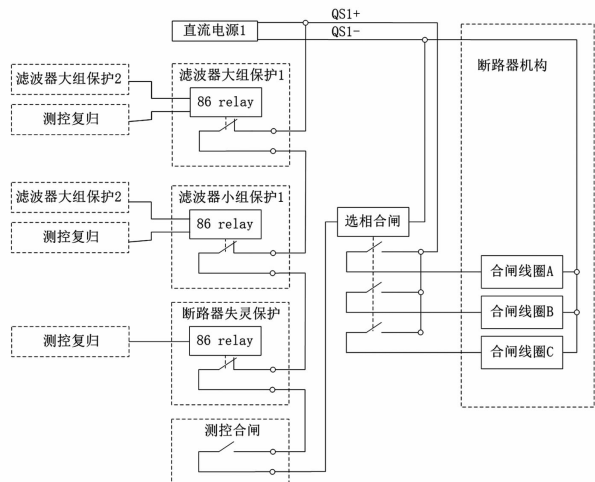


图 6 交流滤波器小组断路器合闸回路接线

以上为欣古换流站 500 kV 交流滤波器小组断路器的合闸回路原理接线方式,其他 500 kV 交流断路器的接线方式在考虑到与对应断路器相关的保护配置后,其合闸回路的接线方式类似,不再赘述。

4 结 语

针对巴西美二工程与国内特高压换流站交流系统二次回路中的 LOCKOUT 继电器的应用和配置原则不同的问题,详细分析和比较了巴西与国内特高压换流站交流系统典型的断路器操作回路的差异性,提出了适用于巴西当地电网运行维护习惯的特高压换流站交流系统二次回路中 LOCKOUT 继电器的配置原则,得出的主要结论如下:

1) 巴西美二工程中 LOCKOUT 继电器用于闭锁断路器合闸;

2) 母差保护、变压器保护、断路器失灵保护、交流滤波器保护等不需要重合闸的保护,均需要启动 LOCKOUT 继电器,且双重化或三重化的保护可共用 LOCKOUT 继电器;

3) 母差保护动作跳闸和断路器失灵联跳母差保护不共用 LOCKOUT 继电器;

4) 线路保护不需要启动 LOCKOUT 继电器,但线路保护中集成的远跳功能需要启动 LOCKOUT 继电器。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [3] IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations: IEEE Std C37. 2™—2008[S],2008.
- [4] 兰岚,王伟民. 基于微机继电保护装置的集成化保护和控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):111-114.
- [5] 曹树林,林榕. 断路器操动机构与继电保护控制回路的协调与配合[J]. 继电器,2005,33(24):72-76.
- [6] ±800 kV 直流换流站设计规范:GB/T 50789—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [7] 高压直流输电系统控制与保护设备 第1部分 运行人员控制系统:GB/T 22390.1—2008[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [8] 高压直流输电系统控制与保护设备 第2部分 交直流系统站控设备:GB/T 22390.2—2008[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [9] 朱韬析,史志鸿,郭卫明,等. 断路器操作箱和就地操作机构内合闸回路的配合问题[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):115-119.
- [10] 李扬. 西门子断路器二次控制回路的比较[J]. 电力建设,2009,30(11):96-98.

作者简介:

陈 鹏(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为特高压直流输电技术、柔性直流输电技术等;

尹 刚(1984),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力系统保护与控制、变电二次设计。

(收稿日期:2021-01-22)

三电平逆变器开关管电压应力解决方案研究

杨 鸽,郑嘉龙,杨 珏,罗雨航
(四川水利职业技术学院,四川 成都 611231)

摘 要:三电平二极管钳位型桥式变流器是适应高电压、大功率应用环境比较好的方案。然而,三电平逆变器开关管在开通关断过程中普遍存在电压应力超标问题。为了解决上述问题,对三电平逆变器开关管应力进行分析后提出了开关管驱动保护电路,设计并优化了三电平的驱动波形。最后,在三电平逆变器实验平台上进行试验验证了该方法的有效性。

关键词:二极管钳位;三电平逆变器;开关管;驱动保护;电压应力

中图分类号:TM 464 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2021)04 - 0080 - 05

DOI:10. 16527/j. issn. 1003 - 6954. 20210416

Solution Research for Voltage Stress in Three-level Inverter with Switch Transistor

Yang Ge, Zheng Jialong, Yang Jue, Luo Yuhang
(Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, Sichuan, China)

Abstract:Three-level diode-clamped bridge converter is a good solution for high voltage and high power applications. However, the problem of excessive voltage stress is common in the switching on and off process of three-level inverter switch transistor. In order to solve the above-mentioned problems, after analyzing the stress of three-level inverter switch tube, a switch tube driven protection circuit is proposed, and the three-level drive waveform is designed and optimized. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by experiments on a three-level inverter experimental platform.

Key words:neutral-point-clamped(NPC); three-level inverter; switch transistor; driving protection; voltage stress

0 引 言

电力电子开关器件现已经被广泛应用于电力电子设备中。对于三相桥式电力电子变流器的拓扑结构,电力电子开关器件在开通关断过程中的电压应力问题不予过多考虑,但是随着电力电子设备的应用更广泛,在高电压、大功率场合就需要设计更能适应这种环境的拓扑结构,比如多电平、级联等。目前主要有 3 种拓扑结构:级联 H 桥型、飞跨电容型和二极管钳位型。研究比较深入和比较常用的是三电平二极管钳位型。但若电压等级越高、串联的开关管数量和电平越多时,则其开关管的电压应力问题

就越来越严重。

由于三电平二极管钳位型(neutral - point - clamped,NPC)逆变器应用比较广泛,国内外也对三电平二极管钳位型逆变器进行大量研究^[1-4]。对于 NPC 的开关管电压应力的研究文献已有一些,如文献[5]对基于 MOSFET 三电平逆变器开关管电压应力产生机理进行了详细的分析研究,并且就三电平开关管的电压应力问题提出了解决方法,主要有两方面:1)选择反并联二极管恢复性能较好的 MOSFET 作为外管;2)使内管开通速度减小为 500 ns,而外管开通速度保持在 300 ns。

下面在上述文献的研究基础上分析了三电平逆变器开关管应力问题,在遵循三电平逆变器开关管驱动原则的基础上设计了驱动保护电路,并重点分析了死区发生电路和状态切换发生器,最终,在相关

基金项目:四川省水利厅科研项目(SKY2019 - 1);四川水利职业技术学院院级科研项目(KY2019 - 13)

实验平台上验证了所提方案的正确性。

1 三电平逆变器开关管应力分析

三电平逆变器的单相等效电路^[6-8]如图 1 所示。这种三电平逆变器每相使用了 4 个开关器件,用 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 表示。通过恰当地组合 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的开关顺序,它能输出 3 种电平。

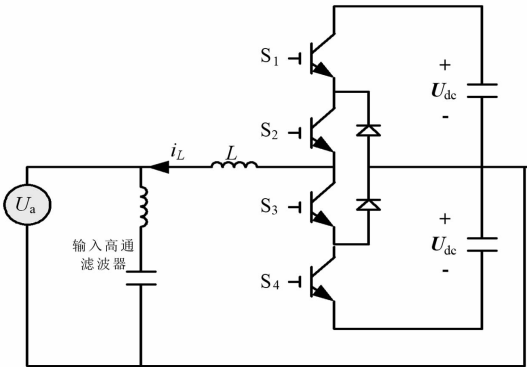


图 1 三电平逆变器的单相等效电路

通常情况下,三电平逆变器的 4 个开关管的驱动与电网电压极性有关,如图 2 所示。当输入电压 U_a 为正电压时, S_1 和 S_3 互补开关, S_2 导通, S_4 断开。当输入电压 U_a 为负电压时, S_2 和 S_4 互补开关, S_1 断开, S_3 导通^[9-11]。

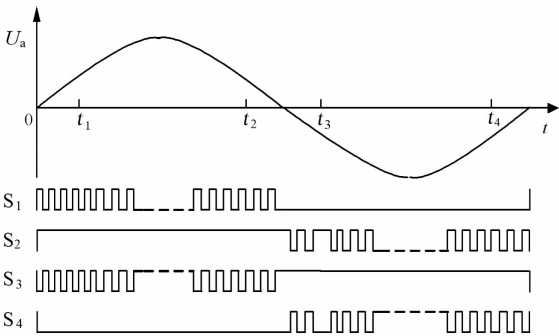
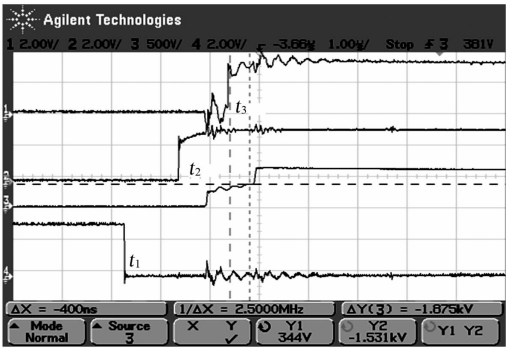


图 2 三电平逆变器的开关波形

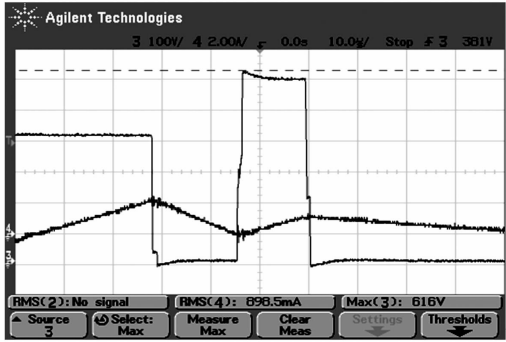
三电平逆变器具有效率高、开关频率高、体积小的优点。但是它对 4 个开关器件驱动的逻辑关系要求很高,否则很容易引起开关器件的电压应力超标。

开关管电压应力超标波形如图 3 所示,对开关管电压应力现象进行详细分析如下:图中 t_1 时刻 S_4 关断, S_1 和 S_2 关断, S_3 保持导通, S_1 和 S_2 的电压均为 405 V; t_2 时刻, S_2 导通,同时 S_3 关断,由于此时电感电流恰好等于 0, S_3 和 S_4 均分 S_2 导通前的 405 V 电压, S_1 两端的电压始终保持为 405 V; t_3 时刻, S_1 开始导通,405 V 电压由 S_3 和 S_4 共同承担。由于 S_3 和 S_4

的特性不一致, S_3 出现电压应力超标的问题,对上述开关管出现的应力现象简要分析后可知三电平逆变器开关管应力主要由于下面两种情况导致:1) 开关管反向导通后电流路径因其互补管的开通发生换流,由此导致了开关管两端电压发生突然变化,二极管反向恢复,产生很大的电压应力尖峰,这时的开关管两端电压值会迅速由 0 V 跃变至直流母线电压值或负母线电压值。此状况主要来源于内管的关断对于外管的影响导致电压应力的突升;2) 开关管闭合后因其互补管的导通导致开关管两端的电压突然变化,这时的开关管两端稳定后电压值跃变幅度会略小于前一状况发生时的电压应力值。



(1) CH1: S_1 驱动, CH2: S_2 驱动, CH3: S_3 电压应力, CH4: S_4 驱动



(2) CH3: S_3 电压应力, CH4: 电感电流

图 3 三电平逆变器开关信号逻辑导致内管电压应力超标波形

2 三电平逆变器开关管电压应力解决方法

2.1 三电平逆变器开关管驱动遵循的原则

为了解决开关器件的应力问题,三电平逆变器的各个开关器件驱动信号之间必须遵守以下切换原则:

- 1) 任何时刻保证先开通内管(S_2/S_3),再开通外管(S_1/S_4);

- 2) S_1/S_3 之间必须互补,并留有足够的死区时间;
- 3) S_2/S_4 之间必须互补,并留有足够的死区时间;
- 4) 任何时刻保证先关断外管,后关断内管;
- 5) 外管关断后,必须保证内管有足够的共通时间,以便外管都建立均衡的电压。

为了遵循上述开关管驱动原则,如图 4 所示设计一种适用于上述原则的三电平逆变器的驱动保护电路。图中,“PWM”为 DSP 输入的 PWM 信号^[12];UPNzVector1/2 为输入电压的极性;00 代表输入电压为正,01 代表输入电压为过零点,10 代表输入电压为负;Protect 为保护信号和关机信号。

整个三电平逆变器的驱动保护电路总共分为两大功能模块:1)死区发生电路模块。这个模块主要功能在于根据 PWM 信号输入,产生 3 组对应于正电压、过零点和负电压的驱动信号,并且保证各个驱动信号之间的死区满足要求。2)状态切换模块。这个模块的主要功能是根据当前电压的极性选择一组恰当的驱动信号。当电压状态发生切换时,保证两个状态切换期间,驱动信号满足以下切换顺序:“先封锁外管驱动→死区时间→强行驱动导通内管→执行与调制策略对应的内管驱动→死区时间→执行与调制策略对应的外管驱动”。并且以同样的时序完成逐波限流保护和开关机保护功能。其中,多路选择开关的功能是根据状态切换时序发生器的输出选择恰当的触发脉冲用于控制三电平逆变器。

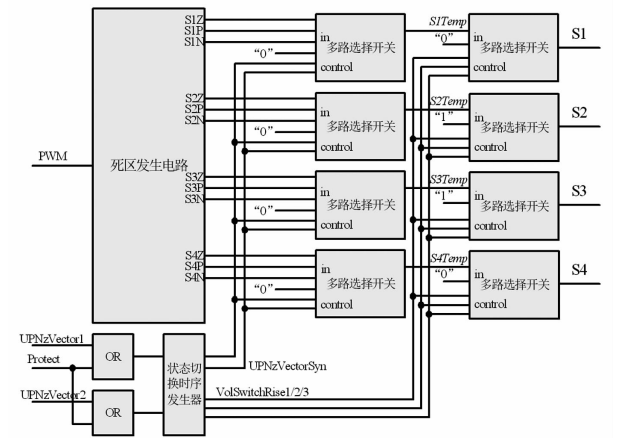


图 4 三电平逆变器的驱动保护电路框

2.2 死区发生电路

死区发生电路以 PWM 输入为基准,产生 3 组共 12 路相互互补的 PWM 信号,这 3 组互补的 PWM 信号分别对应于输入电压为正、输入电压过零和输出电压为负时的驱动波形^[13]。分别以 P/Z/N 为后缀。

例如, S_{1P} 代表输入电压为正时 S_1 管的驱动信号; S_{1Z} 代表输入电压过零点附近 S_1 管的驱动信号。 S_{1N} 代表输入电压为负时 S_1 管的驱动信号,依次类推。

死区发生电路共包含两个定时器、6 个比较器和组合逻辑电路,如图 5 所示。

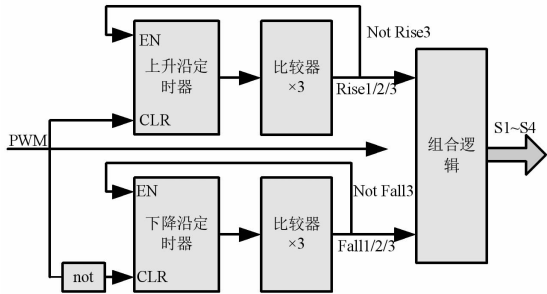


图 5 死区发生电路结构

图 6 为图 5 中各个信号之间的时序图。图中, t_1 代表死区时间, t_2 代表 S_2/S_3 管之间的共通时间。

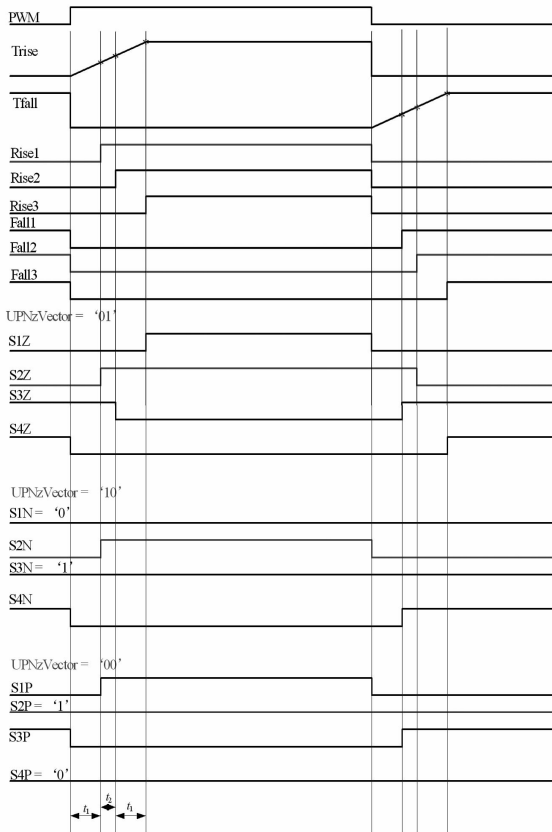


图 6 死区发生电路内各信号间的时序

由图 6 可知,PWM = 1 时,Trise 清零,Tfall 正常计数。反之 Trise 计数,Tfall 清零。当 Rise3 = 1 或者 fall3 = 1 时,相应的定时器停止计数。

Trise = 0 时,Rise1/2/3 = 0。Trise = t_1 时,Rise1 = 1;Trise = $t_1 + t_2$ 时,Rise2 = 1;Trise = $t_1 + t_2 + t_1$ 时,Rise3 = 1。Tfall 的比较过程与 Trise 的比较过程是一样的。

2.3 状态切换时序发生器

状态切换时序发生器的输入为电压的极性以及保护信号。它根据电压的极性和当前保护信号的状态选取死区发生电路的三组输出中的一组作为脉冲。并且保证每个状态之间切换时,各个开关管之间的驱动信号时序满足三电平逆变器驱动时序的基本原则。状态切换时序发生器的输出为同步后的电压极性信号 UPNzVectorSyn 以及各组驱动信号的切换时序控制信号 VolSwitchRise1/2/3。它主要由一个定时器、3 个比较器和若干个触发器组成,如图 7 所示。

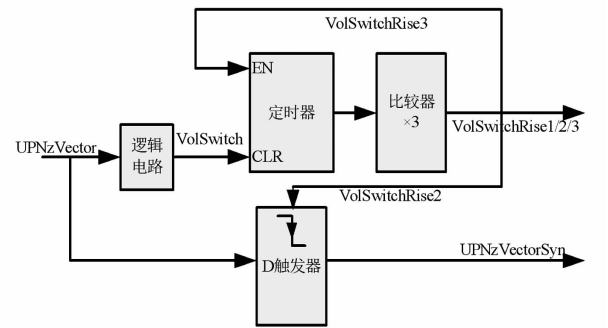


图 7 状态切换时序发生器

在图 7 中,逻辑电路的功能为在 UPNzVector 电平发生变化时产生一个宽度约为 3 个时钟周期的窄脉冲,用于清零定时器输出。

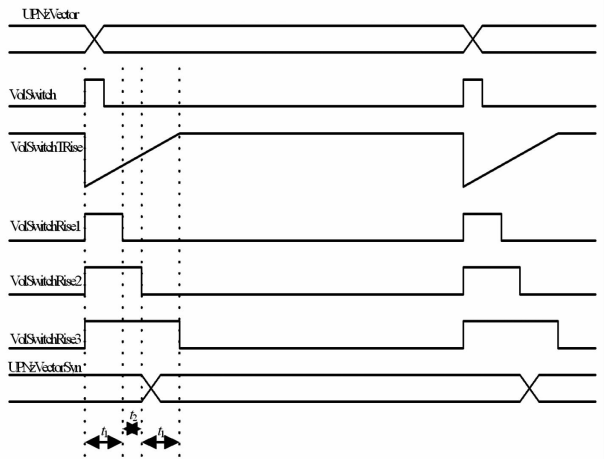


图 8 状态切换时序发生器内部信号逻辑关系

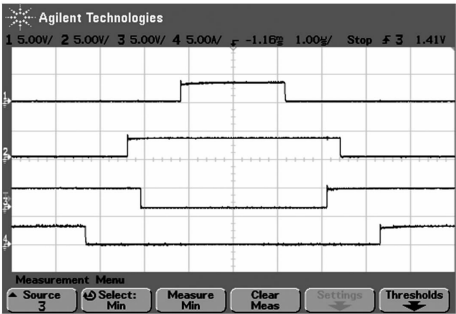
定时器的输入使能端由比较器 3 输出控制,当比较器 3 输出低电平时,定时器维持。定时器的输出 $Timer = 0$ 时,3 个比较器的输出为高电平,控制多路选择开关关闭 S_1 和 S_4 的触发脉冲, S_2 和 S_3 的触发脉冲由 PWM 的状态和当前的电压极性决定。当 $Timer = t_1$ 时,VolSwitchRise1 输出低电平,强制同时导通 S_2 和 S_3 管,让 S_1 和 S_4 管建立 405 V 电压。当

$Timer = t_1 + t_2$ 时,VolSwitchRise2 输出低电平,控制 D 输出器更新电压矢量输出 UPNzVectorSyn,实现内管驱动的切换。 $Timer = t_1 + t_2 + t_1$ 时,VolSwitchRise3 输出低电平,禁止定时器继续计数,同时接手新的外管驱动信号。从而保证在电压极性或者系统开关机过程中始终保证各管的驱动信号满足“先封锁外管驱动→死区时间→强行驱动导通内管→执行与调制策略对应的内管驱动→死区时间→执行与调制策略对应的外管驱动”。

状态切换时序发生器的内部信号逻辑如图 8 所示。

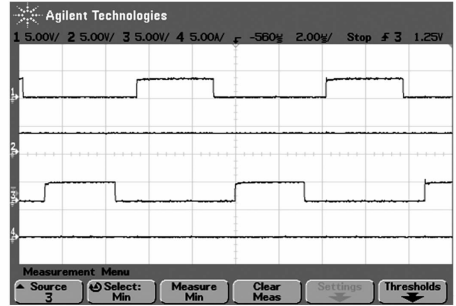
3 实验验证

为了验证所设计的驱动保护电路,适当改变调制算法,在基于 DSP 的三电平逆变器实验平台上进行了开关管电压应力研究试验,试验逆变器模块硬件参数如下:直流母线电压为 800 V;额定输出功率为 6 kVA;47N60CFD、47N60C3 型号的 MOSFET 开关管额定电压为 600 V,其满载时要求降额至 80% 即 480 V 的要求。实验波形如图 9 至图 12 所示。



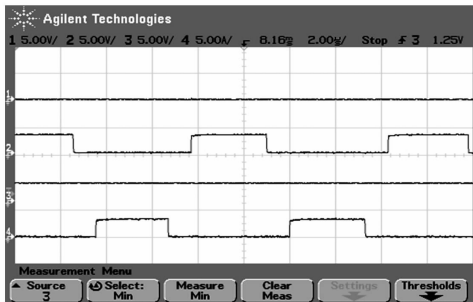
CH1: S_1 管驱动 CH2: S_2 管驱动
CH3: S_3 管驱动 CH4: S_4 管驱动

图 9 逆变器输出电压过零点附近驱动波形细节



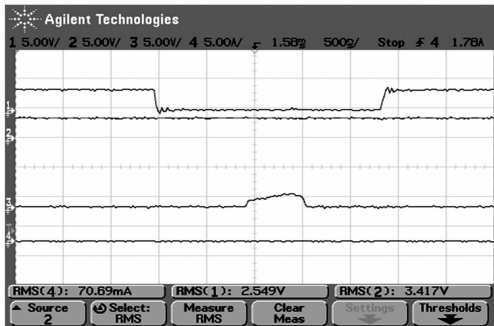
CH1: S_1 管驱动 CH2: S_2 管驱动
CH3: S_3 管驱动 CH4: S_4 管驱动

图 10 逆变器输出正电压且幅值较大时的驱动波形细节

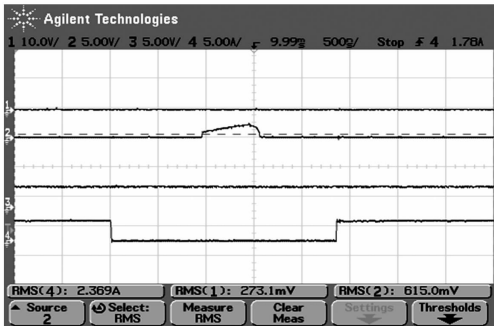


CH1: S₁管驱动 CH2: S₂管驱动
CH3: S₃管驱动 CH4: S₄管驱动

图 11 逆变器输出负电压,且幅值较大时的驱动波形细节



(a) 过零点切负电压



(b) 正电压切过零点

图 12 电压极性切换过渡状态波形

图 9 至图 12 是逆变器输出电压极性切换时的开关管驱动波形,其中对图 9 中的波形进行了详细分析,对“先封锁外管驱动→死区时间→强行驱动导通内管→执行与调制策略对应的内管驱动→死区时间→执行与调制策略对应的外管驱动”这 6 个时间段进行了分析和划分,其余的电压状态切换时开关管驱动波形图中时间段划分也是同样分析。从图 9 至图 12 中可以看出开关管驱动在遵循上述原则下,逆变器输出电压在电压切换时开关管的电压应力都在允许范围内,效果非常好。

4 结 语

上面主要解决三电平逆变器开关管电压应力问

题,在三电平逆变器实验平台上进行所提方案的试验,并测试了逆变器输出电压切换时开关管开通、关断时的电压驱动波形图,从波形图中可知开关管的电压应力问题得到很好解决,该解决方案为今后高电压、大功率场合的开关管电压应力问题提供了技术支持。

参考文献

[1] J. Rodriguez, J. S. Lai, F. Z. Peng. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724 - 738.

[2] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P K, et al. A Survey on Neutural - point - clamped Inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2219 - 2230.

[3] 姜卫东, 赵俊勇, 胡杨, 等. 基于载波实现的二极管钳位型三电平逆变器虚拟空间矢量脉宽调制方法 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 153 - 160.

[4] 闻一鸣, 肖岚, 郑美利亚, 等. 二极管箝位型三电平逆变器的控制方式研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(4): 125 - 128.

[5] 赵炀, 王毅, 夏斌. UPSMOSET 三电平逆变器开关管电压应力分析 [J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 1 - 2.

[6] 王学华, 阮新波. SPWM 控制单向三电平逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 73 - 76.

[7] 万晓凤, 刘琦, 杜利平, 等. 光伏并网系统二电平逆变器的故障诊断 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 122 - 128.

[8] 余运俊, 裴石磊, 谢玉麟. NPC 三电平逆变器混杂建模及开路故障诊断 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 16 - 23.

[9] 张兴, 肖岚. 一种具有中点电位平衡能力的两极三电平逆变器 [J]. 电源学报, 2013(6): 16 - 22.

[10] 高芳, 高锐. 三电平逆变器共模电压分析与抑制 [J]. 中国测试, 2015, 41(12): 106 - 110.

[11] 李岩, 张维戈, 李景新. 双向半桥倍流变换器开关管电压应力分析 [J]. 电源技术, 2014, 38(1): 131 - 133.

[12] 颜景斌, 庞志聪, 李冠达, 等. 双向 Z 源三电平逆变器中点电位动态平衡算法 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 140 - 147.

[13] 宋聪颖. 一种高效软开关三电平逆变器死区模式研究 [J]. 电气传动, 2017, 47(8): 34 - 37.

作者简介:

杨 鸽(1987),男,硕士研究生,讲师,研究方向为电力电子在电力系统中的应用与新能源发电技术。

(收稿日期:2021 - 04 - 22)

时间反演技术在低压脉冲电缆故障定位中的应用

沈智飞, 王 娟, 柳宝坤, 张恒伟, 黄玉兰, 潘仁勇
(尚纬股份有限公司, 四川 乐山 614012)

摘 要: 低压脉冲法可以有效定位电缆中故障点, 并对故障点类型做出判断。但是传统的低压脉冲法需要人为干预分离脉冲和存在无法直观确定故障点位置等问题。为解决该问题, 提出将时间反演技术用于低压脉冲电缆故障定位。首先, 介绍了该方法的原理并阐述了相关计算步骤; 然后, 通过仿真证明了该方法可以在无需人为识别脉冲的前提下有效确定电缆中的故障点, 并对该故障进行类别辨识; 最后, 在实验室中对 105 m 交联聚乙烯电缆制作局部缺陷并用所提方法进行测试。实测结果证明了时间反演技术用于低压脉冲电缆故障定位的可行性和有效性。

关键词: 电力电缆; 故障定位; 低压脉冲; 时间反演

中图分类号: TM 935 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)04-0085-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210417

Application of Time Reversal Technology to Fault Location of Low-voltage Pulse Cable

Shen Zhifei, Wang Juan, Liu Baokun, Zhang Hengwei, Huang Yulan, Pan Renyong
(Sunway Co., Ltd., Leshan 614012, Sichuan, China)

Abstract: The low-voltage pulse method can effectively locate the fault in the cable and judge the type of the fault. The traditional low-voltage pulse method needs to separate the pulse artificially, and it is difficult to directly locate the fault in the cable. In order to solve this problem, the time reversal technology is introduced in low-voltage pulse method for locating the fault. Firstly, the principle of the proposed method is introduced and its calculation process are given. And then, the simulation results prove that the proposed method can effectively locate the fault in the cable and judge the type of the fault without human intervention. Finally, in the laboratory, the proposed method is tested in a 105 m XLPE cable with a local defect. The measurement results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: power cable; fault location; low-voltage pulse; time reversal

0 引 言

随着中国城市电网的发展, 交联聚乙烯(XLPE)电力电缆因其优良的电气性能和机械性能开始被大规模投入城市电网中^[1-2]。大部分 XLPE 电力电缆长期处于地下的恶劣环境中, 在水分、电场、机械损伤和化学腐蚀的作用下, XLPE 电力电缆会在局部位置形成缺陷或者接地故障, 进而影响电网的正常运行^[3-4]。因此快速准确定位 XLPE 电力电缆的故障点对于保证城市电网的稳定运行有着重大意义^[5-6]。

阻抗法故障定位借助电缆的集中参数模型, 在测出电缆线路的电压电流值后, 建立故障距离求解方程, 进而得到电缆的故障位置^[7]。该方法必须保证整个电缆线路的分布参数一致以及引线接触要求高, 因此该方法难以在实际工程中确定故障点位置。低压脉冲法故障定位借助行波在电缆中的传播和反射特性定位电缆中故障点。低压脉冲的时间延迟可用于判断故障位置, 低压脉冲的极性可用于判断故障类别^[8]。该方法拥有着操作简单和设备便携的优点, 因此被广泛使用到电缆的故障定位中。但是目前的低压脉冲方法存在需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。时间反演

(time reversal, TR) 技术^[9-10]是通过将测试端的测试信号进行时间反演后再注入原观测系统,借助原观测系统的传递函数,实现了信号的空间聚焦现象^[11]。因此将 TR 技术用在低压脉冲法中,可以通过检测电缆中不同位置的信号的空间聚焦现象来有效地确定电缆中故障点位置,借此解决原有低压脉冲法中需要人为干预脉冲分离和无法直观定位故障点的问题。

下面将时间反演技术结合低压脉冲法来实现电缆的故障定位并进行验证。

1 技术原理

1.1 低压脉冲法

当高频电压波在电缆中传输时,电缆不能再使用集中参数进行表示,而是要使用如图 1 所示的分布参数表示^[12]。图 1 中, R 、 L 、 G 、 C 分别表示电缆单位长度 Δx 的电阻 (Ω/m)、电感 (H/m)、电导 (S/m) 和电容 (F/m), 其值可由式 (1) 至式 (4) 计算得到^[12-13]。

$$R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (1)$$

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (2)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (3)$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; r_c 和 r_s 分别为电缆缆芯半径和屏蔽层内半径; ρ_c 和 ρ_s 分别为电缆的缆芯和屏蔽层电阻率; σ 和 ε 分别为电介质的电导率和介电常数。

借此确定电缆的特性阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (5)$$

当电缆中出现故障时,故障位置处的特性阻抗会发生变化,造成行波在该位置的反射现象,这导致首端的反射波携带了电缆故障位置处的状态信息。反射波的幅值和极性取决于故障位置处的反射系数 ρ , 即

$$\rho = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (6)$$

式中: Z_i 为故障处的特性阻抗; Z_0 为电缆本体特性阻抗。

低压脉冲法的测试如图 2 所示。该方法首先往电缆中注入脉冲信号,当脉冲信号遇到电缆中故障造成的阻抗不连续点时,此时会产生反射脉冲 P_x 。由于 P_x 包含距首端 x 处电缆的局部阻抗信息,因此可以通过分析 P_x 来定位故障和判断故障类别。即通过确定反射脉冲的时间来定位电缆中故障点,然后通过反射脉冲的极性确定该位置的阻抗变化类型。但是现有的低压脉冲法技术需要人为判断各脉冲是故障点反射造成的还是末端反射造成的,即现有方法存在需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。为解决相应问题,引入 TR 技术结合低压脉冲法实现电缆故障的快捷方便定位。

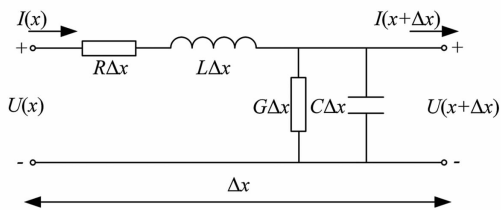


图1 电缆分布参数等效电路

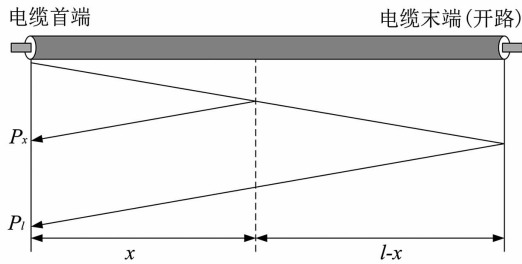


图2 低压脉冲法测试

1.2 时间反演技术在低压脉冲法的应用

考虑低压脉冲法中被测电缆的冲击响应时域函数为 $h_1(t)$, 当注入时域信号 $f(t)$ 时, 得到系统的时域响应信号 $y_1(t)$ 为

$$y_1(t) = f(t) * h_1(t) \quad (7)$$

式中, $*$ 为卷积运算。

将系统的时域响应信号进行时间反演处理, 得到处理后的时域信号 $y_1(-t)$, 将其注入缺陷位置不同的电缆无损镜像模型中, 得到电缆无损镜像模型的时域响应信号 $y_2(t, d)$ 为

$$\begin{aligned} y_2(t, d) &= y_1(-t) * h_2(t, d) \\ &= f(-t) * h_1(-t) * h_2(t, d) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $h_2(t, d)$ 为假设缺陷位置在距首端 d 处的电缆无损镜像模型的冲击响应时域函数。

由式(8)可知, 当 d 为真实缺陷位置时, $y_2(t, d)$ 会出现波形的空间聚焦现象, 其能量会达到极值, 借此可以确定真实故障点位置, 因此定义反演波形能量 $E(d)$ 为

$$E(d) = \int_0^T y_2^2(t, d) dt \quad (9)$$

式中, T 为反演波形的总时长。

利用电缆的传递函数构建电缆无损镜像模型, 即假设缺陷位置在距首端 d 处的电缆无损镜像模型传递函数 $H_2(f, d)$ 为

$$H_2(f, d) = e^{-2j\beta d} + e^{-2j\beta l} \quad (10)$$

式中: f 为频率; l 为电缆总长; β 为相位常数, 可以表示为

$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (11)$$

式中, v 为电缆中电磁波波速。

综上所述, 所提的基于时间反演的低压脉冲电缆故障定位技术包括以下 2 个步骤:

- 1) 在被测电缆的首端注入低压脉冲, 在首端测得电缆的响应波形 $y_1(t)$, 并对其进行时间反演;
- 2) 在缺陷位置不同的电缆无损镜像模型的首端注入步骤 1 中时间反演后的波形, 检测其波形能量, 当波形能量达到极值时, 缺陷位置得到确定。

1.3 入射信号的选取

在确定低压脉冲法的定位方法之后, 接着需要确定低压脉冲法的测试原始波形, 采用文献[14]中的高斯脉冲波作为测试波形, 其具体形式为

$$s(t) = ae^{-(t-b)^2/2c^2} \quad (12)$$

式中: a 为信号幅值控制系数; b 为信号时间控制系数; c 为信号时宽控制系数。

对 $s(t)$ 进行傅里叶变换, 得到其幅频函数为

$$\text{abs}(S(f)) = a \sqrt{2c^2 \pi} e^{-\frac{f^2}{2(\frac{1}{2\pi c})^2}} \quad (13)$$

实际测试得到的 $s(t)$ 为离散信号, 因此进一步得到其幅频函数为

$$\text{abs}(S(f)) = f_s a \sqrt{2c^2 \pi} e^{-\frac{f^2}{2(\frac{1}{2\pi c})^2}} \quad (14)$$

从式(14)中可以看出是 $s(t)$ 的频率分量只与 c 相关, 不同 c 值下具体时域和频域分布结果如图 3 所示。从图中可以看出当 c 值变小时, 时域上 $s(t)$ 的时宽逐渐变小, 频域上 $s(t)$ 的高频成分含量逐渐

增加, 低频成分含量逐渐减少。

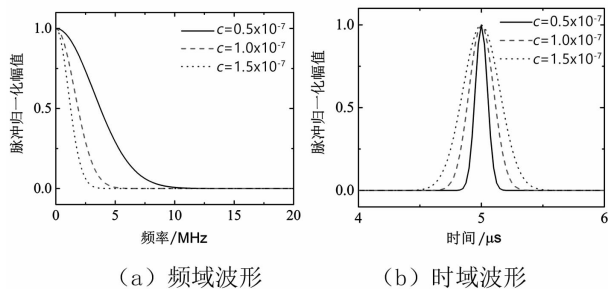


图 3 高斯脉冲时频域分析

图 4 为某 10 kV 电力电缆的衰减系数实际测试结果, 从图 4 中可以看出随着频率的增加, 衰减系数逐渐增加, 说明了在电缆中高频成分衰减较快。对于长电缆而言, 应该增加 c 值, 使信号中的低频成分含量增加, 高频分量成分减少, 保证信号在电缆中稳定传输并在首端能成功采集到电缆中的反射波。从图 3 中可以看出, 此时信号的时宽会增加, 导致电缆中反射波的分辨率下降。对于短电缆而言, 由于长度较短, 高频信号的衰减程度有限, 因此可以减少 c 值, 使信号含有较多高频成分, 缩减信号的时宽, 提高电缆中反射波的分辨率, 有利于识别电缆中的缺陷。

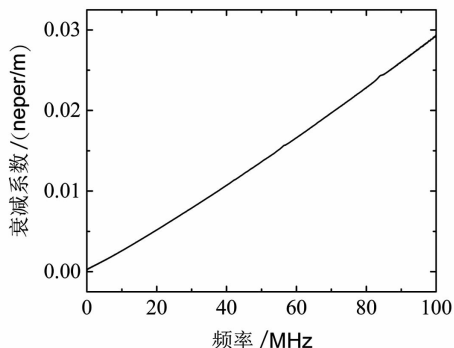


图 4 电缆中信号衰减系数

2 仿真分析

选用如图 5 所示电缆中常见的过渡电阻接地故障进行所提方法的仿真故障定位测试。该模型中, 接地电阻 R_g 设置为 500Ω , 电缆总长 l 为 200 m, 故障位置距首端距离 x 为 120 m。该电缆模型选择为 10 kV 的 XLPE 电缆, 具体参数如表 1^[12-13] 所示。

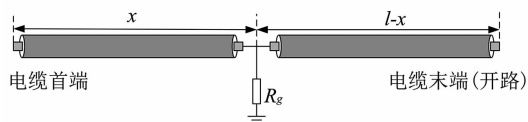


图 5 电力电缆故障仿真模型

表 1 电缆模型参数	
参数	数值
r_c/mm	4
r_s/mm	9.5
$\rho_c/(\mu\Omega\cdot\text{mm})$	17.5
$\rho_s/(\mu\Omega\cdot\text{mm})$	17.5
$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^{-16}
$\varepsilon/(\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	2.04×10^{-11}

该仿真测试中低压脉冲测试波形可以通过式(15)给出。

$$y_1(t) = \text{IFFT}\left\{\text{FFT}(s(t))\frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0}e^{-2\gamma x}\right\} \quad (15)$$

式中: Z_x 为从 x 处看进去的电缆首端阻抗,其模型可以从文献[15]得到;IFFT为快速傅里叶反变换;FFT为快速傅里叶变换; $s(t)$ 为测试信号的时域波形。

通过仿真得到该模型的低压脉冲测试波形如图6所示。在图6中,无法直接确定各反射脉冲是末端反射造成还是故障点反射造成的,亦或是多次反射造成的,即无法直接确定各反射脉冲的对应关系。传统的低压脉冲法此时需要人为干预分离脉冲后,再结合电缆的波速来确定电缆中的故障点,操作较为复杂,无法直观确定电缆的故障位置。

通过所提方法对图6中数据进行处理,处理结果如图7所示。从图7中可以明显看出,所得到的反演波形的能量曲线在130 m处存在一处极值,即定位到故障点距离;同时该极值为极小值,即130 m存在局部阻抗变小的故障,和实验设置一致,证明了所提方法可以有效处理低压脉冲法的测试结果,准确定位电缆中故障点,并对故障点类别进行辨识。

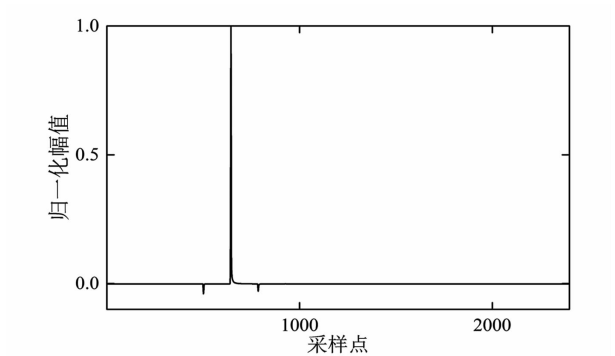


图6 低压脉冲法仿真测试结果

3 实测算例

在105 m 长的10 kV XLPE 电缆上进行实际测试。该电缆在距首端43 m 处剥离外护套,并用饱和食盐水进行浸泡一段时间,待电缆铜屏蔽层产生铜

绿后停止浸泡,以模拟现实情况中电缆外护套破损造成铜屏蔽层腐蚀的缺陷。采用低压脉冲法对该电缆进行测试,测试系统如图8所示,信号发生装置根据电缆长度发射适宜的高斯脉冲波,然后信号采集装置采集反射波数据,得到测试结果如图9所示。

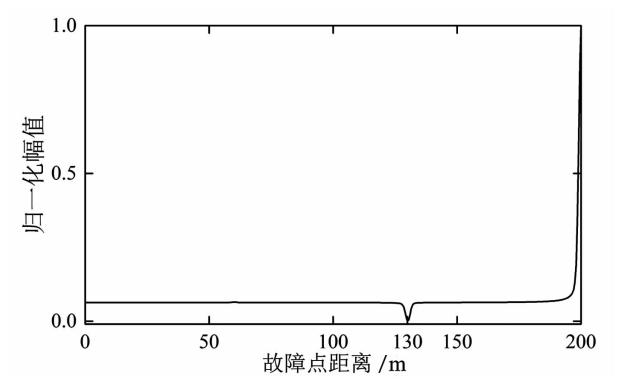


图7 仿真中时间反演处理结果

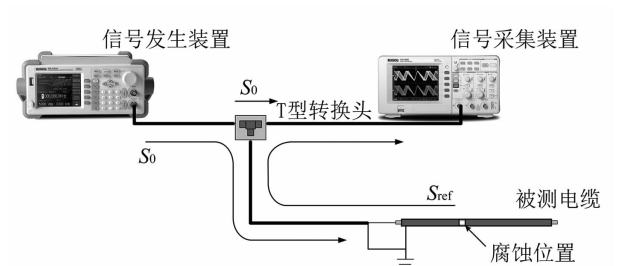


图8 低压脉冲法实际测试

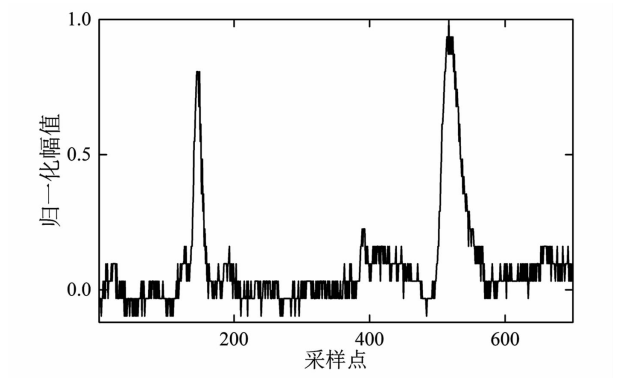


图9 低压脉冲法实际测试结果

从图9中可以看出,针对低压脉冲法而言,直接的测试结果无法直观判断出故障位置,需要先人为进行脉冲识别,即确认各脉冲是故障反射还是电缆末端反射造成的。另一方面,从图9中还可以看出,由于采样设备垂直分辨率的影响,其低压脉冲法中脉冲峰值难以确定,因此难以有效确定缺陷的位置。

利用时间反演技术处理低压脉冲法测试结果,得到反演波形的能量波形如图10所示。从图10中可以看出在43 m 处存在一个明显的极大值,既直观定位到电缆缺陷,又说明了该缺陷是局部特性阻抗增大的缺陷,即同时表明了缺陷类别。该实例成功

说明了所提方法可以有效处理低压脉冲法的测试结果,无需人为进行脉冲识别即可完成缺陷的定位和类别辨识。

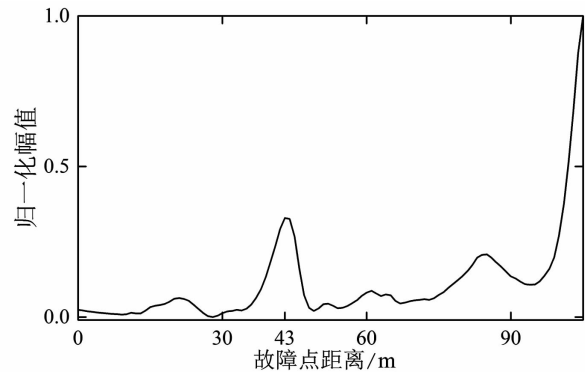


图 10 实测中时间反演处理结果

4 结 语

前面将时间反演技术用于低压脉冲电缆故障测试中,解决了原有方法需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。仿真结果表明,所提方法可以在无需人为识别脉冲的前提下有效确定电缆中的故障点,并对该故障进行类别辨识。实测结果也表明,所提方法可以有效定位真实电缆中故障点,并且受采样设备垂直分辨率的影响较小。

参考文献

[1] 饶显杰,周凯,李明志,等. 基于电力电缆绝缘去极化电流的扩展 Debye 等效电路参数辨识[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 1037 - 1043.

[2] 周凯,陈泽龙,李天华,等. 运行老化 XLPE 电缆导体屏蔽层侧绝缘缺陷分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 187 - 194.

[3] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综述[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 1 - 7.

[4] 唐忠,杨建. 交叉互联电缆行波故障测距的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(5): 64 - 69.

[5] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083 - 3089.

[6] Shi Q, Kanoun O. A New Algorithm for Wire Fault Location Using Time - domain Reflectometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1171 - 1178.

[7] 黄振峰,袁大海,毛汉领,等. 电力电缆绝缘损伤的非线性辨识及故障定位[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(5): 1747 - 1755.

[8] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.

[9] Abboud L, Cozza A, Pichon L. A Matched - pulse Approach for Soft - fault Detection in Complex Wire Networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6): 1719 - 1732.

[10] Razzaghi R, Lugrin G, Manesh H M, et al. An Efficient Method Based on the Electromagnetic Time Reversal to Locate Faults in Power Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1663 - 1673.

[11] Fink M, Prada C. Acoustic Time - reversal Mirrors[J]. Inverse Problems, 2001, 17(1): R1 - R38.

[12] 谢敏,周凯,赵世林,等. 考虑相速度频变特性的改进互相关算法局部放电定位[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1661 - 1667.

[13] 谢敏,周凯,何珉,等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3402 - 3409.

[14] 饶显杰,周凯,谢敏,等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J/OL]. 高电压技术: 1 - 7[2020 - 10 - 25]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200570209>.

[15] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.

作者简介: 沈智飞(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电电缆生产方面的工作。(收稿日期:2021 - 03 - 27)

(上接第 42 页)

[14] 王伟,李开成,许立武,等. 基于一维卷积神经网络多任务学习的电能质量扰动识别方法[J/OL]. 电测与仪表:1 - 10[2021 - 04 - 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210114.1618.006.html>.

[15] 王挺韶,季天瑶,姜雨滋,等. 基于降噪自动编码器与一维卷积网络的风机故障诊断方法[J/OL]. 电测与仪表:1 - 9[2021 - 04 - 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201222.1503.009.html>.

[16] 何成兵,王润泽,张霄翔. 基于改进一维卷积神经网络

的汽轮发电机组轴系扭振模态参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增1): 195 - 203.

[17] 杨德友,邵致远,王博. 基于动态模式分解的发电机惯量及阻尼系数评估方法[J/OL]. 电网技术:1 - 10[2021 - 04 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20210412.1546.009.html>.

作者简介: 齐放(1983),男,硕士研究生,从事电力系统运行与运营工作。(收稿日期:2021 - 04 - 27)

基于分散组播模式的电能表软件更新技术研究

梁 捷¹, 梁广明²

(1. 广西电网有限责任公司计量中心, 广西 南宁 530023; 2. 南宁百会药业集团有限公司, 广西 南宁 530003)

摘 要:针对传统电能表软件远程更新模式在测量点档案与实际不符时会更新失败的问题, 首先, 分析了传统集中式软件更新模式在档案, 信道使用和存储方面存在的问题; 然后, 提出一种基于分散组播模式的电能表软件更新模式, 并给出基于该模式的各过程的软件更新具体方案; 接着, 研究了原程序拷贝及回滚、更新程序的完整性及安全性的保障等更新过程中遇到的主要问题; 最后, 通过实例测试, 验证了所提升级模式的可行性。

关键词:电能表软件更新; 原程序回滚; 完整性校验; 组播

中图分类号: TM 933 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)04-0090-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210418

Research on Energy Meter Software Update Technology Based on Distributed Multicast Mode

Liang Jie¹, Liang Guangming²

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, Guangxi, China;

2. Nanning Baihui Pharmaceutical Group Co., Ltd., Nanning 530003, Guangxi, China)

Abstract: Aiming at the problems that the traditional remote update mode of watt-hour meter software fails to update when the measurement point file does not conform to the actual situation, firstly, the problems of the traditional centralized software update mode is analyzed in the aspects of archives, channel use and storage. And then, a software update mode of watt-hour meter based on distributed multicast mode is proposed, and the specific scheme of software update for each process based on this mode is given. Then the key problems in the process of updating such as the copy and rollback of the original program, and the protection of the integrity and correctness of the update program, are studied. Finally, the feasibility of the proposed upgrade mode is verified by experiments.

Key words: energy meter software update; original program rollback; integrity check; multicast

0 引 言

随着广西电网低压集抄系统“两覆盖”工作的推进^[1], 现场发现许多电能表抄表失败的原因是由电能表软件设计缺陷或故障导致的, 故障处理时需对故障台区中的大量电能表进行软件更新。此外, 随着智能电网的建设, 新能源和电动汽车的接入^[2]以及非侵入式智能家居设备的推广, 对电能表提出更多软件方面的应用功能要求。这些新功能开发应用也需要对现场已安装的电能表进行软件更新来实现测试或应用的目标。

广西电网当前正在推广使用的符合南方电网技术规范的费控电能表, 其上行通信协议虽然给出了软件远程升级的报文格式定义, 但未给出具体的软件更新方案。为此, 针对传统的电能表集中式软件远程更新模式存在的问题, 设计了一种新的分散组播模式的电能表软件远程软件更新方案, 详细介绍了其软件更新的实现过程并通过实例测试验证了其可行性。

1 软件更新方案设计

1.1 总体方案设计

根据国际法制计量组织(OIML)最新修订的电

能表国际建议 IR46,智能电能表管理芯片的软件升级不应影响计量的准确性和稳定性^[3],即要求电能表管理芯片能独立于计量芯片进行软件更新。

由于现场安装的电能表在故障处理以及用户或电网公司有新业务需求时需要进行软件更新;且现场电能表安装数量庞大,安装位置分散,到安装点逐个进行人工更新和由主站进行点对点逐个电能表软件更新的方式工作量大,不能满足实际使用需求;因此要求智能电能表的管理芯支持在线软件更新功能。

传统对批量电能表进行软件更新主要基于主站集中分组的软件更新模式,这里简称集中式软件更新模式。首先,由主站根据自身档案和需求对电能表进行分组;然后,下发软件更新任务,终端根据接收到的更新任务,对电能表进行更新包的组播传输;最后,电能表接收更新包并存储和更新。组播是指根据一定的通信拓扑节点组成的路径将待传输数据进行分布式并发传输的方式,由于通过中间节点进行数据的分布处理,因此该机制的效率比点对点的单播模式高。集中由主站组播的集中更新方式凭借主站的服务器处理能力,数据处理和传输较快,软件更新业务效率高,适用于数据量大的业务过程。

但该方式存在的问题是:在对电能表进行分组时,传统软件更新方式由主站来发起,主站根据已经建立的档案信息来进行分组。由于档案更新不及时,会出现本台区的电能表找不到或者其他台区的电能表被划入本台区等主站所建的档案与实际的台区管辖不一致的情况,导致电能表与主站“失联”^[4]。

对此,为了保证电能表软件更新安全可靠的同时提高软件更新效率,设计了一种由各台区的计量终端分解更新任务的分散式更新模式。从主站侧观察,其过程主要可以分为以下 5 个阶段,如图 1 所示。

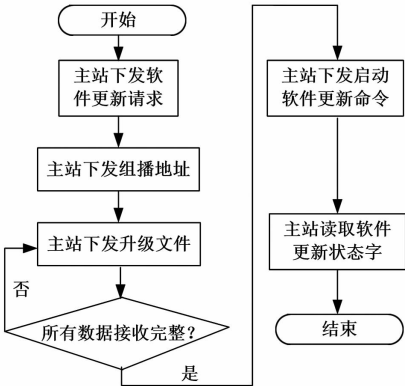


图 1 软件更新主要流程

如图 1,该模式的主要软件更新流程如下:

- 1)更新请求:软件更新请求由主站发起,主站获取待更新电能表厂家版本信息及待更新的模块信息,并下发更新初始化命令,让电能表或模块做好更新准备。
- 2)更新分组:对电能表进行软件更新分组,分组由集中器或采集器完成,分组完成后根据分组情况下发组地址。
- 3)更新程序下载:软件更新程序的下载由主站下发,为满足南方电网对电能表信息安全防护和完整性的要求,更新程序本身需进行加密和完整性校验。终端通过透传方式^[5]直接将更新程序下载到电能表,为了提高更新效率,主站对更新文件采用组播方式下发^[6]。
- 4)更新程序下载确认:软件更新文件下发完成后,由集中器或采集器完成下载完整性检测,以点对点方式获取更新文件下载信息,对丢失包重新下发,所有包都接收完成后,对更新程序进行完整性校验,然后费控电能表通过其内置的嵌入式安全控制模块(embedded secure access module, ESAM)芯片进行解密。
- 5)更新程序更新:下载完成主站下发启动更新命令,可选择立即更新和定时更新两种模式,满足更新要求后将下载的新程序更新到电能表管理芯的程序运行区,实现电能表的在线软件更新功能;电能表更新完成后由主站主动读取电能表更新状态字命令,确认是否更新成功。软件更新过程中计量芯正常工作,计量功能正常运行,避免因管理芯更新而导致电量漏记的问题。

该模式可依靠终端的抄表机制实现软件更新对象的实时和准确核对,但业务流程比集中式模式复杂且对终端的处理能力要求较高。适用于待更新电能表规模不大、要求及时进行信息反馈的更新业务。此外,更新文件采用主站分别下载到终端,由终端再对待更新电能表进行更新文件下发的方式,需在终端预留更新文件存放空间,对终端存储要求高。实际应用中可根据具体应用场景和需求选择集中或分散更新的模式。

1.2 更新方案详细设计

1.2.1 更新请求

区别于传统集中软件更新方式,出于如下考虑,不采用主站直接对电能表下发更新请求的模式:

- 1)主站直接操作电能表,一方面要通过台区识别确定电能表所属的终端;另一方面,在一对一更新时,主站需要知道待更新电能表的通信地址。而实

际主站记录的电能表、终端等的档案信息并不能确保 100% 无误,从而无法保证一定能找到所有需更新的电能表。

2) 主站直接操作电能表在更新期间会增加主站与终端之间的信道通信压力。

3) 主站获取电能表更新判断结果后,需要对更新的电能表信息进行保存,由于电能表数量庞大,信息存储会占用较多数据存储空间。

故所提模式的更新流程是:首先,由主站发起任务,主站获取更新文件中待更新电能表厂家版本信息及待更新的模块信息;然后,将更新任务信息发送给终端,由终端分别对其所辖电能表进行逐一的更新请求的处理,确定哪些电能表需要进行更新。假设计量终端所辖台区中所有电表组成的集合为 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{N-1}, m_N\}$, 则需更新电能表集合 M_Q 定义为

$$M_Q = \{m_n \in M \mid m_n \in M_T \cap M_C \text{ 且 } R(m_n) < R_s\} \quad (1)$$

式中: M_T 为能与计量终端正常通信的电能表组成的集合; M_C 为与更新文件对应的厂家一致的电能表组成的集合; $R(m_n)$ 表示序号为 n 的电能表的软件版本日期; R_s 为更新文件对应的软件版本日期。

将 M_Q 中的电能表通信地址、版本号等信息返回给终端,终端组织所有满足更新条件的电能表信息上传给主站。具体流程如图 2 所示。

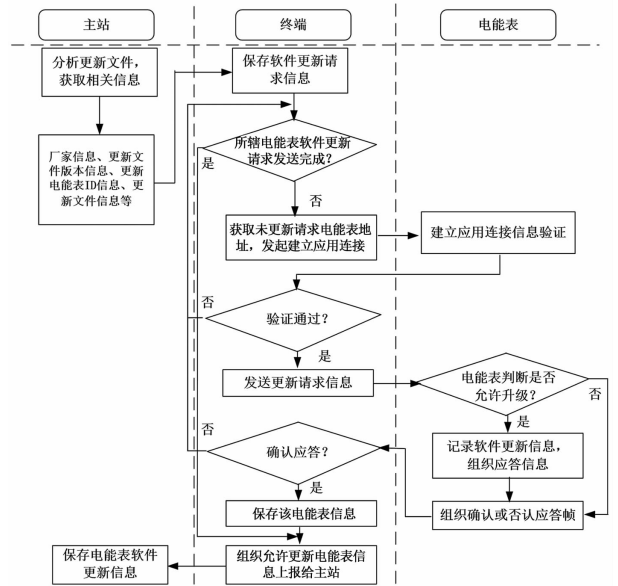


图 2 更新请求流程

从上述过程可见,所提方法的更新请求对于主站来说只需要知道每个终端下面是否有需要进行更

新的电能表即可,不需要知道具体哪些电能表需要进行更新。此外,该过程中,终端 ESAM 需具备与电能表建立安全传输的应用连接的功能,若暂不支持,可以采用明文传输的方式。

1.2.2 更新分组

在主站以单播方式进行单个电能表软件更新的时候,不需要进行分组操作。而对批量电能表更新时,根据组播通信技术要求,此时需要对待更新的电能表进行分组。为减少主站与终端之间的交互,最终减少通信压力,所设计更新模式的更新分组不由主站完成,而是由主站发起任务,通过下发分组地址到终端,再由终端将组地址下发到待更新的电能表,实现对待更新电能表的分组。具体流程如图 3 所示。

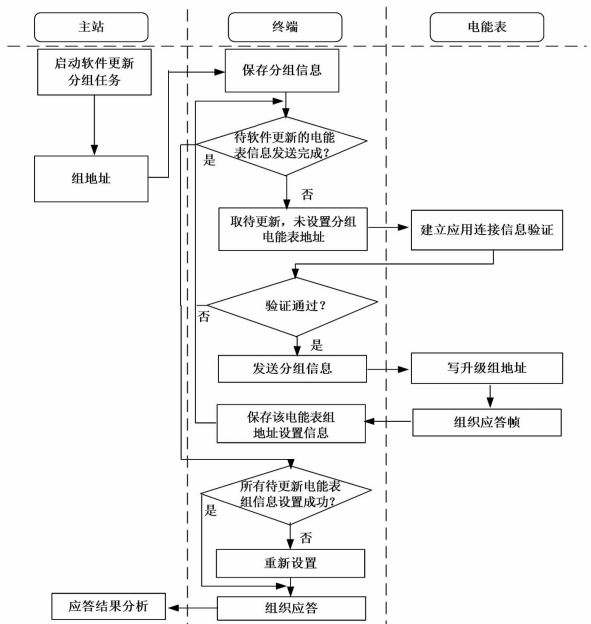


图 3 软件更新分组流程

1.2.3 更新程序下载

更新的程序文件下载采用主站下发到终端的方式。这是考虑到分组后采用组播地址进行文件下发与采用将更新文件下发到终端后再由终端下发到电能表这两种方式相比,虽然主站到终端之间的通信量在理想状态下相差不大,但实际上组播方式进行通讯传输过程中,一次下发成功率比采用主站下发到终端的方式低。当通信失败时,需要对缺失的包进行补发。由于组播机制通常不会预留用于补发的信道资源,故需要补发的电能表通信环境会比其他电能表恶劣。一些电能表可能需要通过多次补发才能实现完成整个更新包的传输,此时如果都通过主站来补发,主站通信量会剧增,从而可能导致通信的

堵塞。故选择采用主站传输更新程序到终端,然后再给电能表进行更新的方式。

更新程序由电能表生产厂家提供。其内容主要包括厂家信息、更新文件版本信息、更新电能表 ID 信息、更新文件信息及更新文件包。更新文件中包括各个模块的可执行程序及整体校验,更新文件通过 AES - 128 算法进行加密,作为一个整体的文件,采用分块传输的方式进行下发,文件下载时需要支持链路层分帧,以便后期分块帧的重组。由于是组播下发,电能表不应答,为获得较高的成功率,可适当延长主站下发数据帧时两帧的时间间隔。更新程序下发具体流程如图 4 所示。

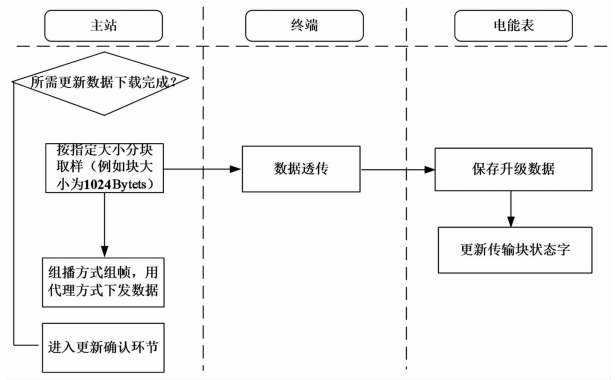


图 4 更新程序下载流程

1.2.4 更新程序下载确认

由于终端对更新文件下载的过程为单方向传输,故为了确保所有电能表均接收到完整的更新文件,终端在文件组播完成后即发起文件下载确认任务,对所辖更新电能表接收信息的确认。更新模式的确认流程如图 5 所示。

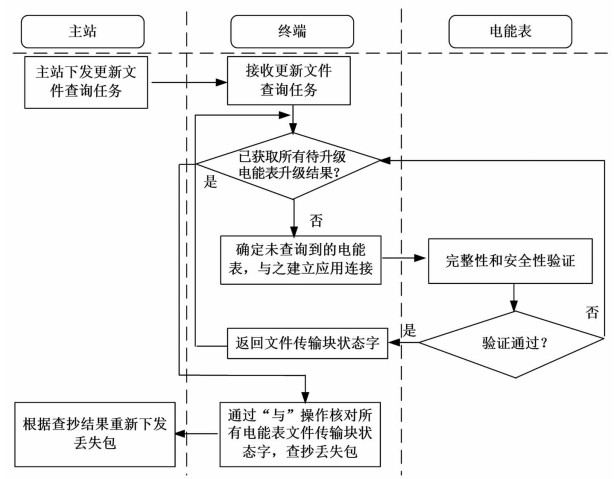


图 5 更新程序下载确认流程

图 5 中,电能表更新文件是否接收完整,由终端查询电能表文件传输块状态字进行判断。对于丢包

的数据,集中器通过对块状态字进行分析,按下述两种补发策略进行更新程序补发:对大批量电能表都丢失的数据块,采用组播方式补;对于少量电能表丢失的数据块,采用单播方式进行补发。在进行下载文件的确认时,如果有某些包补发不成功,终端会进行有限次数的重复补发,若超过补发次数,则放弃该电能表的补发,继续更新流程。上述异常情况下,后续电能表收到更新启动命令时若数据包接收不完整,则返回异常应答给主站,主站再进一步的处理。

1.2.5 软件更新程序安装

升级程序安装时,首先由主站下发启动安装更新任务;为了确保接收电能表均能接收到完整的更新文件,由终端采用点对点方式下发该命令到电能表,电能表应答启动更新结果传给终端,终端再透传给主站,流程如图 6 所示。

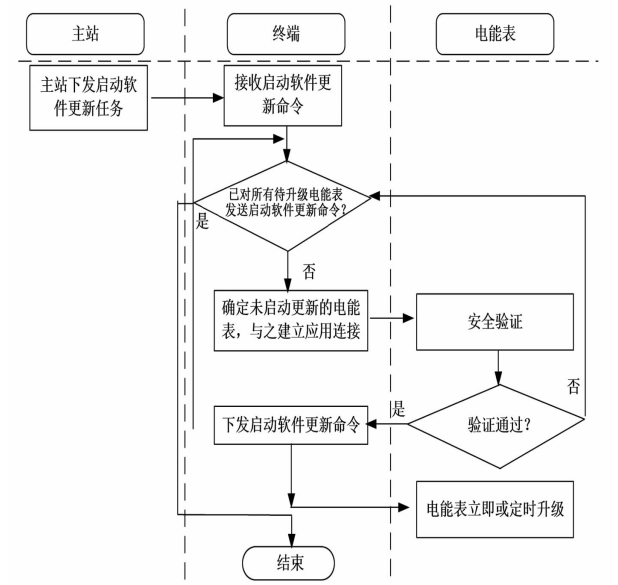


图 6 更新程序更新流程

更新任务有两种模式:一种为下载完成并校验后立即进行管理芯片程序安装的立即安装模式;另一种为通过设置时间参数进行定时更新程序安装的模式,可根据具体应用场景选择不同方式,大批量现场软件更新通常采用定时安装模式,避免更新时和重要采集任务冲突。

2 更新过程关键问题

2.1 原程序拷贝及回滚

相对于将要更新的程序,这里将电能表微处理器(MCU)内正在运行的应用程序称为当前应用程序。相对地,当前下载到外部闪存(FLASH)内、比

当前版本高一个版本、还未更新到 MCU 的应用程序称为待更新应用程序。

该应用程序在出厂前会烧录在电能表的管理芯内,同时还会额外下载一个同样的应用程序到电能表的外部 FLASH 内;更新程序更新前应将电能表内的原应用程序拷贝到 MCU 外部的 FLASH 芯片中。更新后,则将新的应用程序和外部存储芯片中的原应用程序进行功能核验。若核验不一致,则用该拷贝的程序进行回滚覆盖。若更新后有其他异常情况时,例如新应用程序频繁异常复位、复位超过门限次数,电能表自检到这种异常后也将回滚恢复至原应用程序。

2.2 更新程序的完整性及安全性核验

更新程序的软件完整性和安全性分别通过 CRC 校验和国标加密算法 AES-128^[7] 保证。先对更新程序整体做循环冗余校验码(cyclic redundancy check,CRC)校验。CRC 校验是发送方通过对待发送数据进行多项式计算,并将计算结果附在报文中,接收方根据同一算法进行查错的数据传输检错方法。通过这种方法来保证软件的完整性和正确性。然后,根据南方电网费控电能表信息交换安全认证技术要求,再使用 AES-128 加密算法对包含 CRC 的更新程序整体进行加密,避免报文的核心数据域以及 CRC 被篡改。

2.3 更新相关事件记录

在电能表更新程序过程中,更新初始化事件、更新校验成功事件、更新校验失败事件、更新激活成功事件、回滚事件,每个事件都会记录相应时标及对应固件版本号便于后续的软件管理和故障分析。

3 实验验证

为验证所设计的电能表更新模式的可行性,搭建模拟测试平台进行测试,由测试主站通过该模式给 61 只同一厂家同一批次的费控电能表进行远程软件更新。结果显示 1024 kB 的应用程序更新时间为 16 min 左右。

在该更新程序下载过程中,由于采用分块传输,每个程序更新块大小为 512 Bytes,则共需传 2000 块。每个更新块组帧时作为数据域,然后加上帧头、帧尾、地址等上行通讯规约定义的帧结构部件,则更新报文每条的长度为 551 Bytes。采用窄带载波方式以 1200 bit/s 速率传输。实测通信传输时间需要

983 s,即约 16 min,基本满足现场应用需求。该时间包含电能表回复帧传输时间、收发双方通信延时、电能表接收到更新块后进行存储和更新的时间。

4 结 语

所设计的电能表远程管理芯片软件的分散式更新方案,在案例测试时,观察到其更新程序下载过程中未影响电能表计量芯的正常工作。程序更新期间,峰平谷各费率的电量累积的准确性也可得到保证,电能表程序更新前后也未引起表内基本参数和底度等重要数据的改变,在测试环境中验证了其可行性。如何进一步提高该方案在发送大文件时的传输效率和稳定性,解决大批量电能表组播更新时的“广播风暴”问题,值得进一步研究。

参考文献

[1] 万忠兵,谢智,王韬. 基于本征时间尺度分解和时间序列分析的电能计量误差预测方法[J]. 电气应用, 2017(2):79-84.

[2] 刘文华,梁永全,冯 政等. 基于加权均方残差的改进双聚类算法[J]. 模式识别与人工智能,2016,29(6):519-526.

[3] 陈杜琳,陈魁,张国玉. 一种针对含稀疏误差向量的线性多变量系统递归辨识算法[J]. 工业控制计算机, 2016,29(11):114-116.

[4] 高金兰,康迪,雷星宇. 基于改进模糊聚类分析的电力系统不良数据辨识[J]. 电气自动化,2018,40(5):30-33.

[5] 王晶. 电力系统异常数据检测辨识方法综述[J]. 电力与能源,2015,36(6):813-817.

[6] 杨海涛,牟婷婷,杨海滔,等. 基于序列光滑性分析的集抄数据缺陷判定[J]. 电网与清洁能源,2016, 32(8):73-78.

[7] 梁捷,李刚. 基于节点特征分类的配电网重构辐射约束处理法[J]. 广东电力,2016,29(8):91-95.

[8] 张瑞琴. 基于信息熵聚类的异常检测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[9] 梁捷. 基于禁忌动态规划的含电动汽车机组组合研究[J]. 电力工程技术,2018,37(2):67-72.

[10] 李亦非,宋玮琼,彭放,等. 基于局部异常点检测算法的电能表飞走异常智能分析[J]. 电测与仪表,2016, 53(18):69-73.

作者简介:

梁 捷(1987),男,工学硕士,工程师,主要从事电能计量管理方面工作。 (收稿日期:2021-01-08)