

· 电网技术 ·

一种可用于电缆局部放电检测的串联谐振系统

卢雨欣¹, 李波², 支亚薇², 陈宇飞¹, 曾肖明¹, 颜源¹

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要:交联聚乙烯电缆正日益取代传统的架空线路, 逐渐成为城市输配电网络的重要组成部分。复杂的电力电缆网络对电缆的故障检测技术提出了更高的要求, 然而传统的串联谐振系统存在大量的脉冲干扰, 导致其只能进行耐压试验而不能用于局部放电检测, 难以满足电缆绝缘状态评估的需要。为了实现电缆绝缘状态全面且可靠的评估, 文中提出了一种改进的串联谐振系统, 利用等脉宽调制技术和时域开窗技术滤除脉冲干扰, 实现了在开展电缆耐压试验同时进行局部放电检测的功能, 并用实验室试验验证了系统的有效性。

关键词:交联聚乙烯电缆; 串联谐振; 局部放电; 等脉宽调制技术; 时域开窗技术

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)06-0044-05

0 引言

相比于架空线路, 电力电缆具有可靠、安全、美观、占地面积小等特点, “线路下地”已成为我国城市发展的重要内容之一^[1]。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆由于其良好的电气性能、机械性能和防腐防损等优点, 在我国输配电网络中占有主导地位。随着我国输配电网络的不断完善, 截止2017年底, 国家电网所有在运的交流电力电缆线路总长度已达1 343 972km^[2]。全面且可靠的电缆绝缘状态检测是日渐庞大的电力电缆线路安全稳定运行的前提保障。

《GB 50150—2006 电气装置安装工程电气设备交接试验标准》指出, 新竣工的电力电缆必须进行耐压试验, 对XLPE电缆推荐进行交流耐压试验^[3]。工频耐压试验对电源容量要求极大, 在现场试验中一般采用频率范围为20~300 Hz的调频式串联谐振设备进行耐压试验^[4]。然而电缆中存在的非贯穿缺陷并不一定能通过耐压试验暴露出来^[5], 反之耐压试验会导致非贯穿缺陷进一步恶化, 通过耐压试验但运行一段时间后发生击穿事故的案例并不少见^[6]。因此, IEEE 400.2—2013标准将现场电缆绝缘离线检测试验分为耐压试验、诊断参数类试验以及局部放电(partial discharge, PD)试验。我国《电力设备交接和预防性试验规程》在近年修订中也添加了局部放电检测一项。传统的调频式串联谐振系统一般采用正弦脉宽调制(sinusoidal pulse

width modulation, SPWM)技术调制输出波形^[7], 大量由电力电子器件开通关断产生的脉冲噪声分布在输出电压波的整个相位上^[8], 影响电缆局部放电检测。因此传统串联谐振系统只能进行耐压试验, 无法对电缆绝缘状态进行全面可靠的评估。

本文基于传统的调频式串联谐振电路拓扑结构, 提出了一种同时适用于电缆耐压试验和局部放电检测的调频式串联谐振系统, 并在实验室条件下对本系统功能进行验证。

1 系统原理

1.1 串联谐振原理

串联谐振系统是通过控制逆变桥改变输出电压频率和占空比, 使电抗器与被测电缆进入谐振状态而产生高电压^[9], 其主要电路结构如图1所示。

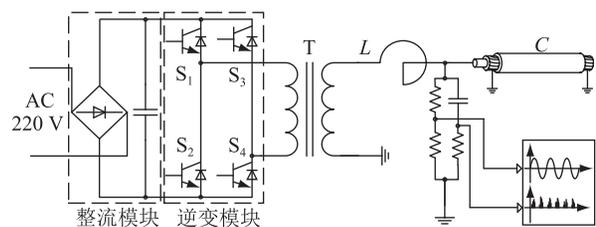


图1 串联谐振电路原理

Fig.1 Schematic of frequency-tuned resonant system

图1所示的串联谐振系统由整流模块、逆变模块、激励变压器T、电抗器L、分压器和局部放电检测单元组成。逆变模块输出电压频率 f 与电抗器电感值 L 和被测电缆电容值 C 有关^[10], 计算公式如式(1)所示:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)资助项目(6132620101)

式中: L 为电抗器电感值; C 为电缆等效电容值。

电路处于谐振状态时,电抗器的感抗与电缆的容抗相抵消,电路阻抗表现为纯电阻状态,可计算电路的品质因数 Q ,如式(2)所示:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2)$$

式中: ω 为电路的谐振元频率; R 为电路总直流电阻值。

当激励变压器二次侧输出峰值为 U_0 正弦电压波时,在被测电缆上最高可以激发出峰值为 QU_0 的正弦电压波^[11]。对应的,逆变电源输出有功功率为 P_0 ,在被测电缆上最高可以激发出 QP_0 的无功功率。相比于工频耐压试验,电源容量可以减小 Q 倍,而对于用于配电电缆现场试验的调频式串联谐振设备而言, Q 的值通常大于20。因此对于电缆离线检测,调频式串联谐振技术可以大大减小试验电源的体积与质量。

1.2 逆变模块控制方式

传统的串联谐振系统常采用SPWM调制技术,其控制原理如图2所示,通过采用一对相反的调制波 $U_r, -U_r$ 与三角波载波 U_c 进行波形比较,得到4路逆变开关 $S_1 \sim S_4$ 的控制信号 $C_1 \sim C_4$,此时逆变模块输出的SPWM波形 U_i 如图2所示^[12]。

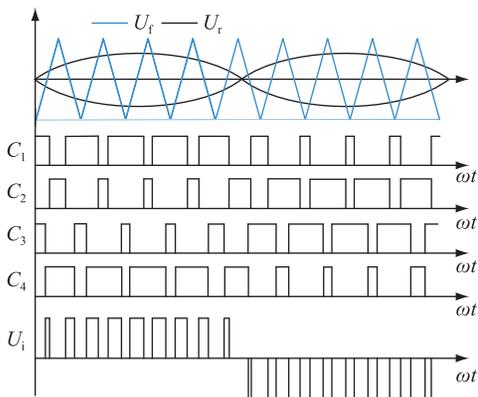


图2 SWPM 调制原理

Fig. 2 Diagram of SPWM

由图2易知,SPWM调制技术通过三角载波将连续的调制波离散化,分解成多个电平的叠加。理论上载波频率越高输出电压的谐波畸变率越低,输出波形越接近调制波,但这一切是建立在逆变桥4个开关器件以极高的频率通断的基础上。

开关器件的每一次开通关断都意味着电路拓扑结构的改变以及某一支路中电流的急剧减小,在实际电路中杂散电容电感的作用下,每一次开关器件通断状态的变化都伴随着高幅值的脉冲电压。而SPWM调制技术要求逆变模块的半导体开关频

繁开通关断,导致脉冲干扰与局部放电信号混淆^[13],因此基于SPWM调制技术的串联谐振系统无法用于局部放电检测。

为尽可能减小逆变模块半导体开关器件的开关频率,本系统利用等脉宽调制技术替代SPWM调制技术^[14],利用两个幅值相反的方波替代正弦波的一个周期。逆变模块输出电压波形如图3所示,输出电压 U_i 与开关导通情况如表1所示。

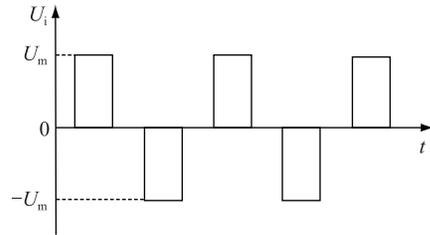


图3 逆变电路输出电压波形

Fig.3 Output voltage waveform of inverter

表1 逆变桥输出电压与开关导通情况

Tab.1 Status and output voltage of inverter

开关导通情况	逆变桥输出电压
S_1, S_4 导通, S_2, S_3 关断	U_m
S_1, S_4, S_2, S_3 关断	0
S_2, S_3 导通, S_1, S_4 关断	$-U_m$

假设逆变桥输出为理想的幅值为 U_m 和 $-U_m$ 阶跃电压,且经过变压器T后电压波形不变化只是幅值提升8倍,则可将逆变模块视为一个输出电压为0, $U_m, -U_m$ 的直流电压源,从而建立串联谐振电路统一模型如图4所示^[15]。

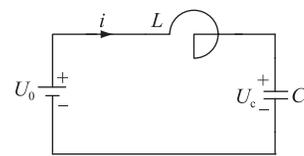


图4 谐振等效电路统一模型

Fig.4 Model of resonant circuit

利用图4所示的等效电路统一模型可列出微分方程组如方程组(3)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + U_c = U_0 \\ C \frac{dU_c}{dt} = i \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 为电感 L 流过的电流; U_c 为电容两端电压; U_0 为等效直流电源输出电压。

方程组(3)的通解为:

$$\begin{cases} u_c(t) = U_0 + A_1 \cos\omega t + A_2 \sin\omega t \\ i(t) = C\omega(A_2 \cos\omega t - A_1 \sin\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω 为电感 L 与电容 C 的自然谐振角频率; A_1 , A_2 为微分方程组通解系数。

由式(4)易知 U_c 以正弦规律变化,在谐振电路充能过程中 U_c 峰值不断增大。实际的谐振电路中存在电阻,因此电容电压峰值不会无限增大,其电压峰值如式(5)所示:

$$U_c = QU_1 \quad (5)$$

式中: Q 为谐振电路品质因数; U_1 为逆变模块输出方波的基波分量峰值。

对方波进行傅里叶分解,其基波分量幅值如式(6)所示:

$$U_1 = \frac{4U_m}{\pi} \sin\left(\frac{D\pi}{2}\right) \quad (6)$$

式中: U_m 为逆变模块输出电压; D 为逆变模块输出方波的占空比。

由式(5)和式(6)易知,通过控制输出方波的占空比可调节电容最大电压峰值 U_c ,当电容电压峰值达到最大后,电容电压呈稳定正弦规律变化。

1.3 局部放电信号处理

对于上文所述的等脉宽调制技术,逆变模块输出信号与脉冲干扰信号对应关系如图5所示,每次逆变模块的状态变化都会产生脉冲干扰。在逆变模块开通时,逆变模块输出电压突变会产生较大的脉冲干扰^[16];而由于开关器件存在续流二极管,在逆变模块关断时会产生幅值相对较小的脉冲干扰^[17]。这种脉冲干扰的特征与局部放电信号特征较为相似,难以通过小波降噪等常见的信号处理技术完全滤除脉冲干扰^[18],导致对电缆绝缘状态的评估出现偏差。

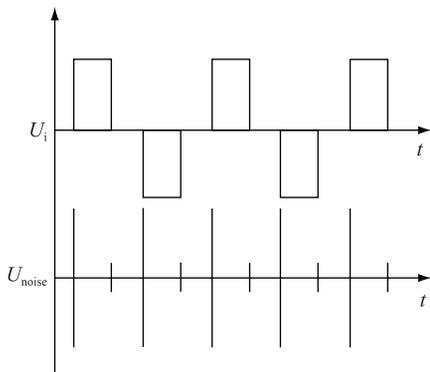


图5 逆变模块输出电压与脉冲干扰波形
Fig.5 Output voltage waveform and pulse noise waveform of inverter

如图5所示,采用等脉宽调制技术在每个调制周期内存在4处与逆变模块动作同相位的窄带脉冲干扰,为避免脉冲干扰影响局部放电检测精度,可直接剔除逆变模块动作前后一段时间内的数据。

串联谐振系统谐振频率需小于300 Hz,因此串联谐振周期在3 ms以上,每个周期内剔除数十微秒的数据不会对局部放电检测结果产生较大影响^[19]。

1.4 局部放电缺陷定位

采用时域反射法对局部放电缺陷位置进行定位^[20],其定位原理如图6所示。将已知长度为 l_0 测试电缆的屏蔽层接地,线芯一端接测试设备,线芯另一端开路。当距离测量端 x 处发生局部放电时,局部放电脉冲将沿电缆两个相反的方向传输,其中一个脉冲在 t_0 时刻到达测量端;另一个脉冲经过电缆末端开路全反射后沿电缆向测量端继续传播,在 t_1 时刻到达测量端^[21]。利用式(6)可计算出局部放电缺陷与测量端的距离 x :

$$x = l_0 - \frac{\Delta t v}{2} \quad (7)$$

式中: v 为放电脉冲在电缆中的传播速度; Δt 为两个脉冲到达电缆测量端时间差; l_0 为电缆长度。

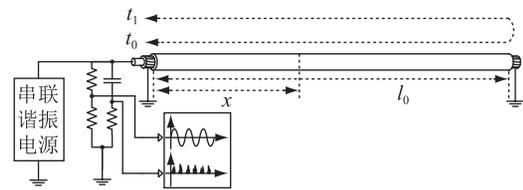


图6 时域反射法原理

Fig.6 Diagram of time domain reflection

2 试验研究

在实验室中搭建试验电路,选取两段8.7/10 kV的XLPE电缆,电缆型号为YJLV22-1×35 mm²,每段电缆长度为100 m,在两段电缆接头处设置针尖缺陷。为保证耐压试验与电缆实际运行状态的等效性,谐振频率应在20~300 Hz范围内。对于长度为100~3000 m范围内的10 kV配网电缆系统,电缆的等效容值一般在20 nF~1.5 μF之间。选取电抗器电感值 $L=20$ H,通过式(1)计算可得谐振频率范围为29~252 Hz满足IEC 60270标准要求^[4]。变压器变比为1:8,容量为40 kV·A。

电缆所施加电压与局部放电信号如图7所示,可明显观察到在每个谐振周期中均存在脉冲干扰信号,经过比对脉冲干扰信号与逆变模块的输出电压可知,脉冲干扰是由逆变模块半导体开关动作导致的开关噪声。脉冲干扰详细波形如图8所示,易知脉冲波峰值在10 μs以内衰减至10 mV以下。滤除逆变模块动作10 μs时间段数据后的局部放电信号如图9所示。

利用时域反射法在电缆测量端注入脉冲,通过

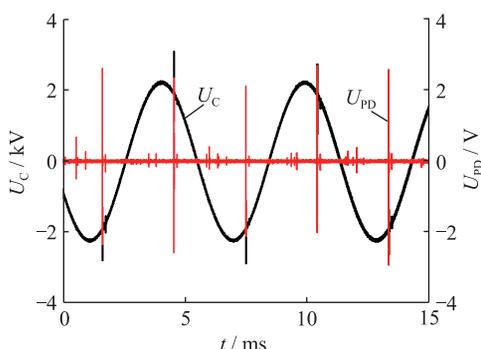


图7 高压波形与局部放电波形
Fig.7 Diagram of voltage and PD

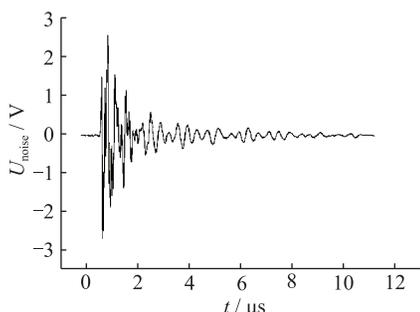


图8 脉冲干扰波形
Fig.8 Waveform of pulse noise

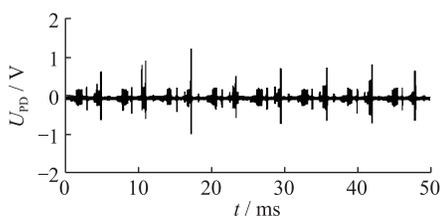


图9 滤除干扰后的局部放电波形
Fig.9 Diagram of pure PD

测量注入脉冲反射波的到达时间,可计算得到被测电缆中脉冲信号的传播速度。对于前文所述试验平台,计算所得波速为 $165 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。一次局部放电及其反射波的详细波形如图 10 所示,易知两个脉冲到达测量端的时间差为 $1.24 \mu\text{s}$,利用式(6)计算可得局部放电缺陷距离测量端 97.7 m 。

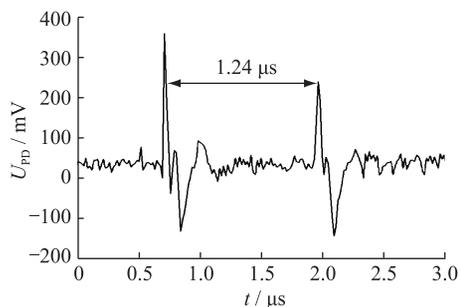


图10 局部放电脉冲详细波形
Fig.10 Magnified detail of the PD pulse

利用前文所述的时域反射法对所有局部放电脉冲信号进行依次定位分析,将其定位结果绘制散点图如图 11 所示,易知局部放电缺陷定位结果在距离测量端 100 m 处表现出集中性,这与试验中实际设置的缺陷位置相符合。

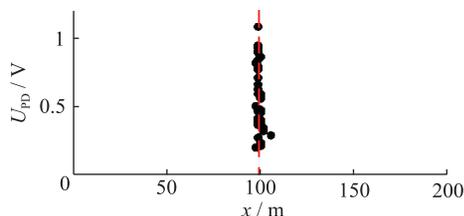


图11 局部放电缺陷定位散点
Fig.11 Diagram of PD location

3 结语

传统的串联谐振设备只能进行耐压试验,在电缆网络复杂程度不断升级的今天,已不能满足电力电缆绝缘状态检测的需要。本文基于传统串联谐振技术,结合等脉宽调制技术和时域开窗技术,对传统的调频式串联谐振系统进行改进,使其在进行耐压试验的同时还可实现局部放电检测,并利用时域反射法实现了局部放电缺陷定位功能。

参考文献:

- [1] 葛少云,董智. 基于区间层次分析法的城市电网电缆化改造[J]. 中国电力,2004(10):38-41.
GE Shaoyun, DONG Zhi. Cabling reconstruction of urban electric network based on interval analytic hierarchy process[J]. Electric Power,2004(10):38-41.
- [2] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010,49(7):100-104.
- [3] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB 50150-2006 [S]. 北京:中国计划出版社,2006.
Electrical equipment installation engineering electrical equipment handover test standard:GB 50150-2006 [S]. Beijing:China Planning Press,2006.
- [4] High voltage test techniques for Partial discharge measurements; IEC Std 60270-2015 [S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [5] 周远翔,赵健康,刘睿,等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable [J]. High Voltage Engineering, 2014,40(9):2593-2612.
- [6] 鲁宁. 高压 XLPE 电缆击穿的制造因素分析及有效控制[J]. 电力工程技术,2017,36(4):43-47,58.

- LU Ning. Manufacture factor analysis and effective control of high voltage XLPE cable breakdown[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(4):43-47,58.
- [7] 黄新波,张周熊,程文飞,等. 智能型串联谐振试验电源电压及频率的研究[J]. 高压电器,2014,50(6):7-12.
HUANG Xinbo,ZHANG Zhouxiang,CHENG Wenfei, et al. Research for voltage and frequency of intelligent series resonant test power supply[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(6):7-12.
- [8] HE W, WANG Q, HUANG C, et al. A cost-effective technique for PD testing of MV cables under combined AC and damped AC voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, PP(99):1-1.
- [9] 丁干,徐至新,陈方亮,等. 串联谐振耐压试验系统自动调频电源的研究[J]. 电力电子技术,2006(6):71-73.
DING Gan, XU Zhixin, CHEN Fangliang, et al. Study on frequency-tuned power supply of ACRF system[J]. Power Electronics, 2006(6):71-73.
- [10] 李宏,贺昱曜,王崇武. 一种全桥负载串联谐振逆变器谐振频率跟踪和输出功率控制方法[J]. 电工技术学报, 2010,25(7):93-99.
LI Hong, HE Yiyao, WANG Chongwu. A new method of frequency tracking and output power control for full bridge series load resonant inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(7):93-99.
- [11] 刘玮,肖勇. 220 kV 交联超长电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术,2008,34(4):831-832.
LIU Wei, XIAO Yong. On-site withstand voltage test of 220 kV cross-linked long cable[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):831-832.
- [12] 戴珂,王舰威,陈睿,等. 两种典型的三相 SPWM 逆变器电路比较[J]. 电工技术学报,2012,27(2):82-88,108.
DAI Ke, WANG Jianwei, CHEN Rui, et al. Comparison research on two typical three-phase SPWM inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(2):82-88,108.
- [13] 赖联有,许伟坚. 基于零相位误差滤波的局部放电故障识别[J]. 电力工程技术,2018,37(3):67-71.
LAI Lianyou, XU Weijian. Recognition of partial discharge faults using zero phase error filtering[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(3):67-71.
- [14] 吕宏,黄玉水,张仲超. 串联谐振单相全桥逆变器常用控制方法的研究[J]. 电源技术应用,2002(5):36-38.
LYU Hong, HUANG Yushui, ZHANG Zhongchao. Research on control methods of serial resonant single-phase full bridge inverter[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2002(5):36-38.
- [15] 丁鑫龙. 调频谐振式交联聚乙烯电缆耐压试验电源的研制[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2012,22(3):13-17.
DING Xinlong. On-site AC voltage withstand test of high voltage XLPE power cable on type of FM resonance [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science Edition), 2012,22(3):13-17.
- [16] 王庆华. 新型串联谐振测试系统及其在中压电缆局部放电检测中的应用研究[J]. 绝缘材料,2017,50(7):61-65.
WANG Qinghua. Study on novel series resonance test system and its application in partial discharge detection of medium-voltage power cables[J]. Insulating Materials, 2017,50(07):61-65.
- [17] CHEN X, Y SHEN, D CHEN, et al. Investigation on the burst noise detection of inverter based on the dynamic multi-distinguish analysis empirical mode decomposition [C] // International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF). IEEE, 2015: 1-4.
- [18] ZHOU X, ZHOU C, KEMP I J. An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising[J]. Dielectrics and Electrical Insulation IEEE Transactions on, 2005,12(3):586-594.
- [19] 张龙,王笑棠,黄晨曦,等. 不同频率振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电特性的研究[J]. 高压电器,2015,51(11):128-133,139.
ZHANG Long, WANG Xiaotang, HUANG Chenxi, et al. Characteristics of partial discharge in XLPE cable under damped AC voltage with different frequency [J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(11):128-133,139.
- [20] 翟禹尧,郭纲. 航空电缆 TDR 数据去噪与故障定位新方法[J]. 现代防御技术,2016,44(6):128-134.
ZHAI Yuyao, GUO Gang. New method of data denoising and fault location for aviation cable TDR [J]. Modern Defence Technology, 2016,44(6):128-134.
- [21] 赵进军,侍海军,张少炎. 电力电缆故障探测技术分析[J]. 江苏电机工程,2007,26(3):18-20.
ZHAO Jinjun, SHI Haijun, ZHANG Shaoyan. Technique analysis of power cable fault detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2007,26(3):18-20.

作者简介:



卢雨欣

卢雨欣(1994—),男,博士研究生,研究方向为电力设备绝缘状态检测(E-mail:luyuxin@stu.xjtu.edu.cn);

李波(1988—),男,博士,工程师,从事新能源发电系统控制算法研究、智能用电控制方向研究工作(E-mail:boge546@126.com);

支亚薇(1990—),女,硕士,工程师,从事电力电子与电力传动相关工作。

(下转第74页)

Reactive Power Optimization of Distribution Network With Distributed Generation Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

LU Yuting¹, ZHAO Tianle¹, DU Hongji¹, ZHU Xinyao²

- (1. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Reactive power optimization in distributed network with distributed generation is a complex nonlinear optimization problem. In this paper, the improved particle swarm optimization algorithm is used for the reactive power optimization of distribution network. The optimization model is established with the minimum system loss and average deviation of voltage as the objective function and the node voltage and capacitor switching capacity as the constraints. The position variance is introduced into the particle swarm optimization to prevent the particle swarm algorithm from falling into the local optimal solution. The particle is mutated according to the fitness value of the particle in the population, and the performance of algorithm is improved on the basis of guaranteeing the convergence speed of the algorithm. IEEE14 node distribution system with distributed generation as an example is simulated, the results demonstrate that distributed generation can enhance the stability of the power grid and the algorithm has better optimization performance.

Key words: reactive power optimization; improved particle swarm optimization algorithm; location variance

(编辑 杨卫星)

(上接第 32 页)

Regional Monthly Load Forecast Based on EEMD-ARIMA Model

GUO Jianpeng¹, SHE Yingling², WEN Buying²

- (1. State Grid Fujian Integrated Energy Services Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: Load forecasting is the basis for planning of the grid. The accuracy of the forecast is related to the safe, reliable and economic operation of the grid. In order to solve the problem of low prediction accuracy due to the unstable original data, this paper proposes an ARIMA prediction model based on the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), which performs the noise processing on the monthly load of a certain area, and then performs empirical mode decomposition to make the components smoothed. Each component is predicted by ARIMA model. Finally, the component prediction results are added to obtain the final predicted value. The example shows that the prediction accuracy of the regional monthly load of the EEMD-ARIMA model is higher than that of the ARIMA model.

Key words: ensemble empirical mode decomposition; ARIMA model; monthly load forecast

(编辑 胡昊明)

(上接第 48 页)

A Frequency-tuned Resonant System for PD Measurement and Withstand Test

LU Yuxin¹, LI Bo², ZHI Yawei², CHEN Yufei¹, ZENG Xiaoming¹, YAN Yuan¹

- (1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: XLPE cables have become an important part of urban transmission and distribution networks in recent years. As cable systems become more complex, simple withstand voltage test can not meet the needs of cable fault detection. However, the traditional frequency-tuned resonant system has a large amount of pulse interference, which makes it impossible to use for partial discharge (PD) measurement. It introduces an improved frequency-tuned resonant system, using pulse width modulation and time domain elimination to achieve PD measurement and withstand test at the same time. The effectiveness of the system is verified by experiments.

Key words: XLPE cables; frequency-tuned resonant system; partial discharge; pulse width modulation; time domain elimination

(编辑 钱悦)