

文章编号:1001-1609(2007)05-0389-05

基于小波变换的电缆局部放电定位中时延算法研究

杜言, 廖瑞金, 周 凇, 陆云才

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

Study on Time Delay Estimation Algorithm in Cable Partial Discharge Location Based on Wavelet Transform

DU Yan, LIAO Rui-jin, ZHOU Quan LU Yun-cai

(The key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要:在电缆局部放电定位直接相关法的基础上,研究出了一种基于小波变换的广义相关时延估计算法。此算法放宽了直接互相关法对信号与噪声的假设条件且在低信噪比下仍能有效估计时延;同时为了提高时延估计精度,在广义相关时延估计的基础上又研究出了基于基小波的二次加权法。利用PSCAD/EMTDC仿真分析论证了这两种算法在电缆局部放电定位中的有效性。

关键词:交联聚乙烯电缆;局放定位;小波;二次加权

中图分类号: TM247

文献标志码: A

Abstract: Based on direct correlation method and wavelet transform, a general correlation time delay estimation algorithm was proposed. It extended the assumed condition of direct cross-correlation for signal and noise, and was capable to estimate time-delay effectively under low signal noise ratio. Moreover, a base-wavelet based twice-weighted method was proposed to improve the accuracy of time-delay estimation. Using PSCAD/EMTDC to emulate the cable partial discharge location, simulation results validated the two algorithms.

Key words: XLPE cable; partial discharge location;

wavelet; twice-weighted method

0 引言

与以往的架空线路相比,交联聚乙烯(XLPE)电缆具有供电可靠性高、布线不受地面与空间建筑物的影响、有利于美化城市和优化厂矿布局、不受恶劣气候侵害等诸多优点^[1],获得了越来越广泛的应用。

局部放电检测是有效判断XLPE电缆绝缘状况的重要手段^[2],如何快速找出局部放电点是研究的重点之一。传统的电缆局放定位方法是时域反射法(TDR),也称之为行波法^[3],其关键是估计两个传感器测得信号的时间差即时延估计。目前所用的各种

时延估计方法如自适应时延估计、广义相位时延估计^[3]和LMS时延估计^[4,5]等,均是在广义相关时延估计的基础上改进的。它要求信号和噪声互相独立,还要求已知信号和噪声的先验知识,而实际情况并非如此,这就限制了时延估计方法在电缆局部放电定位中的应用。

20世纪80年代小波变换已被成功地运用于各类工程领域。由于它在时域和尺度域(一定程度上对应于频域)具有良好的局部特性,文[6-8]已经利用这一数学工具在局放领域做了大量的研究并取得了相当的成就。笔者从理论上推导了小波分析与相关时延估计算法之间的联系,结合小波变换的特点研究了基于小波变换的广义相关时延估计算法和基于基小波的二次加权法。针对电缆中局放定位问题,利用PSCAD/EMTDC软件建立了电缆局放模型,在不同条件下仿真验证了这两种算法。仿真证明了基于小波变换的广义相关时延估计算法和基于基小波的二次加权法能克服广义相关算法的一些缺陷,提高了时延估计精度,能够适用于电缆的局部放电定位。

1 基于小波变换的广义相关时间法

1.1 广义相关法

设从一个信号源上发射的信号并附加噪声时,在两个独立传感器上接收的两个信号数学模型为

$$x_1(t)=S(t)+n_1(t); x_2(t)=\alpha S(t-D)+n_2(t) \quad (1)$$

传统对信号进行时延估计的方法是直接相关法^[3]。它计算简单、直观,但由于互相关函数受信号的谱性和噪声的影响,此方法不能兼顾时延估值的分辨率和稳定性。为解决该矛盾,提高低信噪比条件下的时延估值能力,文[9]在1976年提出了广义相关

收稿日期:2007-03-25; 修回日期:2007-04-24

作者简介:杜言(1981-),男,硕士研究生,主要从事电力设备的在线监测与故障诊断研究。

时延估计方法,其基本思想是两个接收信号在进行互相关前要先进行某种线性预滤波处理,然后再根据滤波输出信号的互相关函数的峰值估计时延。原理见图1。图中 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 经过 $H_1(\omega)$ 、 $H_2(\omega)$ 预白化滤波后得到 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$,其互相关及互相关谱分别为

$$\begin{aligned} R_{y_1 y_2}(\tau) &= E\{y_1(t)y_2(t+\tau)\} = y_1(t) * y_2(-t) = \\ & [x_1(t) * h_1(t)] * [x_2(-t) * h_2(-t)] = \\ & [x_1(t) * x_2(-t)] * [h_1(t) * h_2(-t)] = \\ & R_{x_1 x_2}(\tau) * [h_1(t) * h_2(-t)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$G_{y_1 y_2}(\omega) = F\{R_{y_1 y_2}(\tau)\} = G_{x_1 x_2}(\omega) H_1(\omega) H_2^*(\omega) \quad (3)$$

其中 $R_{x_1 x_2}(\tau)$ 为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的相关函数; $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$ 分别是 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的单位冲击响应。

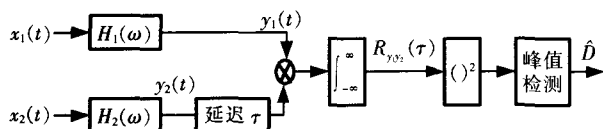


图1 广义相关时延估计方法原理图

根据相关函数 $R_{x_1 x_2}(\tau)$ 与其互功率谱 $G_{x_1 x_2}(\omega)$ 的傅里叶变换关系,可得

$$\begin{aligned} R_{y_1 y_2}(\tau) &= F\{G_{y_1 y_2}(\omega)\} = \\ & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_1(\omega) H_2^*(\omega) G_{x_1 x_2}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \\ & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_g(\omega) G_{x_1 x_2}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\varphi_g(\omega) = H_1(\omega) H_2^*(\omega)$ 称为广义相关的权函数。广义相关器实际上是在IFFT之前,对互相关函数进行加权或加窗,目前常用的权函数有4种^[9]。

1.2 基于小波的广义相关法理论

小波分析用联合的时间和尺度平面来描述信号,同时兼顾了短时傅里叶变换和时频分析的特点,使它在处理非平稳信号中有一定的优势。从系统响应的角度来看,小波变换是将信号分解到一系列选择性相同的频带上,实质上为信号 $x(t)$ 经一系列带通滤波器滤波后的输出^[10]。

将小波变换引入时延估计算法,借鉴广义相关时延估计理论的加权法,在此用基小波在不同尺度下的频谱 $\psi^*(a\omega)$ 对相关谱密度函数 $G_{x_1 x_2}(\omega)$ 进行加权,从而得到了基于小波变换的广义相关时延估计。

$$\begin{aligned} R_{y_1 y_2}(\tau) &= F\{G_{y_1 y_2}(\omega)\} = WT_{R_{x_1 x_2}}(a, \tau) = \\ & \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{x_1 x_2}(\omega) \psi^*(a\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\varphi_g(\omega) = \sqrt{a} \psi^*(a\omega)$ 。

从式(2)、(3)来看,这就相当于用小波产生 $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$ 以形成权函数

$$W(\omega) = H_1(\omega) H_2^*(\omega) = \sqrt{a} \psi^*(a\omega) \quad (6)$$

即在相关前,利用小波分别对信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$

进行预滤波。因为小波加权相对经典加权^[11]不需要信号和噪声的先验知识,这就克服了传统的广义相关法的局限性。

若在一般的广义相关时延估计权函数加权之后,再用小波加权一次,即形成二次加权处理,也就是用小波在不同尺度下对互相关函数 $R_{y_1 y_2}(\tau)$ 进行处理,滤除噪声对 $R_{y_1 y_2}(\tau)$ 的干扰,以提高低信噪比时的广义相关时延估计精度。二次加权处理的一般形式是

$$\begin{aligned} R'_{y_1 y_2}(\tau) &= F\{G'_{y_1 y_2}(\omega)\} = \\ & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W'(\omega) G_{x_1 x_2}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (7)$$

其中权函数为

$$\begin{aligned} W'(\omega) &= H_1(\omega) H_2^*(\omega) W(\omega) = \\ & \sqrt{a} H_1(\omega) H_2^*(\omega) \psi^*(a\omega) \end{aligned} \quad (8)$$

比较式(6)、(8)可知:基于小波变换的广义时延估计是二次加权的一种特例($W(\omega)=1$ 时),也可说成后者是前者的一种发展。虽然二者都具有小波变换的一些特点,但前者并不需要信号和噪声的先验知识。

2 仿真研究

2.1 电缆模型

利用PSCAD/EMTDC中的Bergeron Model电缆模型对电缆局放系统进行仿真,验证时间延迟算法在电缆局部放电定位中的可行性。配置一根500 m长的10 kV电缆,将该模型简化为3部分:导体层、屏蔽层和外皮,见图2,其参数见表1。

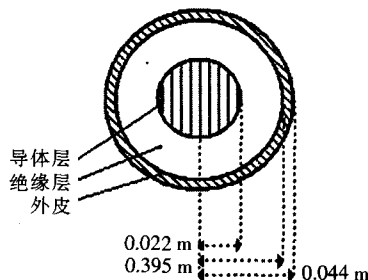


图2 10 kV 电缆模型

表1 10 kV 电缆模型参数

电缆长度 L/m	导体半径 r_c /mm	绝缘半径 r_i /mm	外壳半径 r_s /mm	$\rho / \Omega \cdot m$	ϵ_D
500	22	39.5	44	1.68e-8	4.1

如图3所示,电缆中设置的缺陷点位于距电缆一端150 m处的C点,从此点注入一个上升沿300 ns的窄脉冲模拟产生的局放信号,分别在电缆的两端A点和B点进行测量。

2.2 基于小波变换的广义相关法仿真

通过仿真来说明基于小波变换的广义相关时延估计和直接相关时延估计的性能,其中加入的噪声是均值为零、方差为常数的高斯白噪声。在仿真中,

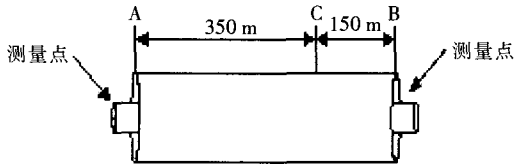


图 3 电缆配置图

系统的采样率设置为 10 M/s, 已知电缆局放信号的延迟点数为 $D=38$ 。

分别对信号加入白噪声的不同相关情况和不同信噪比下进行了仿真实验, 表 2 为信噪互不相关条件下的结果, 在互相关情况下得到的结果见表 3。其中 $\hat{D}$ 为直接相关法时延估计值, $\hat{D}_2, \hat{D}_4, \hat{D}_8, \hat{D}_{16}$ 分别对应基于小波的广义相关法在尺度 $2^1, 2^2, 2^3, 2^4$ 上的时延估计值 (尺度 2^3 代表小波的 8 层分解, 其它亦然)。其中非整数的时延估计都是利用三点插值公式对输出互相关函数峰值附近的三点经内插和求极值得到的。该仿真确定用 dbN 小波作为这两种算法的基小波, 在此全部选用 db8 作为分析用基小波。

表 2 信噪不相关条件下直接相关时延估计与基于小波的广义相关时间延迟估计值

信噪比 (不相关)/dB	相关时延估计	基于小波的不同尺度时延估计值			
	$\hat{D}$	$\hat{D}_2$	$\hat{D}_4$	$\hat{D}_8$	$\hat{D}_{16}$
-3	38.425	\	\	38.512	37.785
-10	\	\	\	38.825	39.536

注: \ 代表不能估计时延或误差较大

表 3 信噪互相关条件下直接相关时延估计与基于小波的广义相关时间延迟估计值

信噪比 (互相关)/dB	相关时延估计	基于小波的不同尺度时延估计值			
	$\hat{D}$	$\hat{D}_2$	$\hat{D}_4$	$\hat{D}_8$	$\hat{D}_{16}$
-3	\	\	\	38.647	37.891
-10	\	\	\	38.858	36.365

图 4、5 是当噪声与信号相关, 信噪比为 -10 dB 时, 直接相关时延估计和基于小波的广义相关的仿真图。图中横坐标为时延估计值, 纵坐标为相关系数。图 5 中, 从图 (a)~(d) 分别为基于小波的广义相关法在尺度 $2^1, 2^2, 2^3, 2^4$ 上的时延估计。

从表 2 可以看出, 在较高信噪比且信噪不相关时, 直接相关时延估计法和基于小波的广义相关法在尺度 $2^3, 2^4$ 上都能够较准确地对测得的脉冲信号时间差进行估计。当信噪比降低到 -10 dB, 直接相关法已经无法进行时延估计, 而此时基于小波的广义相关法在尺度 $2^3, 2^4$ 上仍能够有效估计时延, 说明基于小波的广义相关法相对直接相关法抗干扰能力更强, 时延估计精度更高。

从表 3 和图 4、5 可以看出, 当信噪之间互相关时, 即使在较高的信噪比下, 直接相关法也无法对局放脉冲的到达时间差进行估计, 这是由前面讨论的

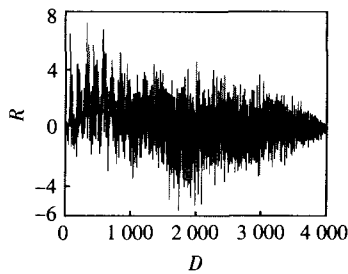


图 4 SNR=-10 dB 时直接相关时延估计

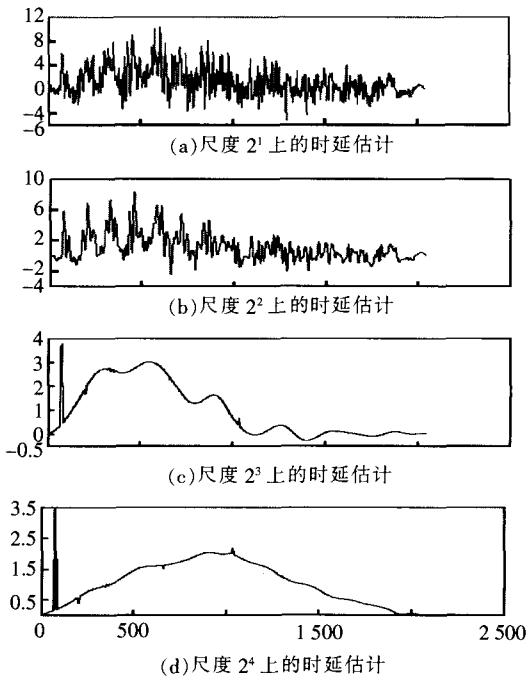


图 5 SNR=-10 dB 时基于小波的广义相关时延估计在不同尺度上的结果

直接相关法的局限性造成的。此时基于小波的广义相关法在尺度 $2^3, 2^4$ 上仍能估计时延。

从以上分析可知, 将小波引入广义相关法中, 不仅取消了直接相关法估计信号时间延迟的限制条件, 还提高了时延估计的精度, 扩大了广义相关法的应用范围, 使其能够适用于电缆的局部放电信号处理。

2.3 基于小波的二次加权法仿真

在不同信噪比情况下分别对测得信号做一次和二次加权估计。仿真结果见表 4。

表 4 一次加权处理与二次加权处理估计的时延值

处理器	信噪比/dB	一次加权时延估计	二次加权在不同尺度上的时延估计			
			$\hat{D}_2$	$\hat{D}_4$	$\hat{D}_8$	$\hat{D}_{16}$
Roth	0	38.385	\	\	39.247	38.563
	-10	\	\	38.826	38.485	37.773
Phat	0	37.706	\	38.248	38.754	39.236
	-10	\	\	38.586	38.902	39.581
ML	0	38.147	36.178	37.438	38.425	39.178
	-10	38.572	\	37.369	38.453	39.059
	-15	\	\	37.687	38.295	39.332

图 6、7 给出了用 Roth、Phat 和 ML 处理器 (最大似然估计处理器) 在信噪比为 -15 dB 时一次加权和

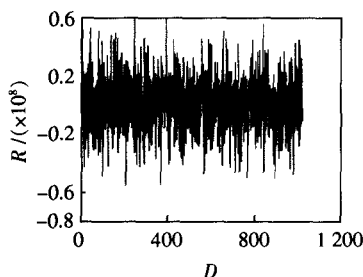


图6 SNR=-15db 时 ML 一次加权估计

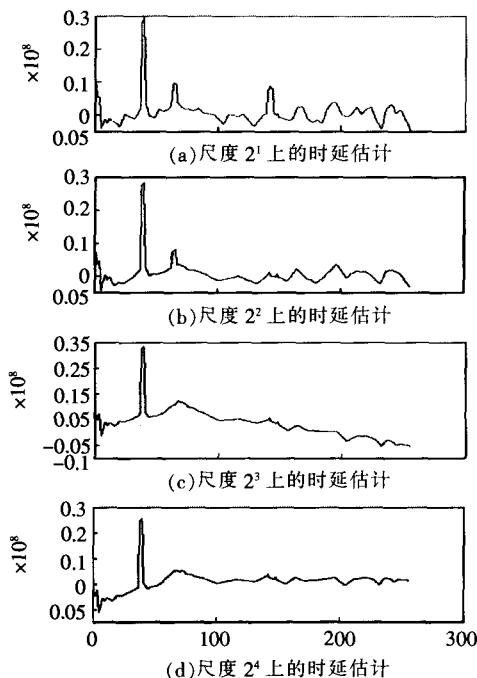


图7 SNR=-15 dB 时小波二次加权估计

在此基础上利用 db8 基小波进行二次加权的时延估计仿真结果。

从表4可知:基于小波的二次加权时延估计,不论在哪个处理器上加权,均能在尺度 2^3 、 2^4 上估计时延,特别是在低信噪比下,一次加权不能估计时延,更显出了它的优越性。最大似然估计处理器 ML 是一次加权中性能最佳,但随着信噪比低到-15 dB,从图6看其广义相关法的最大峰值也已严重偏离估计值,不能估计时延。而其二次加权估计见图7,在尺度 2^3 、 2^4 有一明显峰值,其对应的时间正好是其估计时延。这说明真正的时延隐藏在相关函数的噪声中,若再用基小波加权一次,就能从隐藏在附加噪声的相关函数中估计时延。换句话说,就是用小波变换对带噪的相关函数在不同尺度上进行滤波,从而使低信噪比时的时延估计得以实现,这就证明了基于小波的二次加权时延估计法在低信噪比下有其明显的优势。

3 模拟试验

3.1 试验线路

将一根长 8.4 m 的 10 kV 的 XLPE 电力电缆(波阻抗约为 37Ω)与一根长 14.2 m 的同型号 XLPE 电

缆相连,两端通过 37.5Ω 的匹配电阻接地,在两端的电线上安放两个相同型号的微电流传感器(频带为 20 kHz~15 MHz),用长约 5 m 的信号电缆连到力科 7100 示波器(带宽 1 GHz,采样率 20 G/s,4 通道)上,局部放电模拟脉冲由 KJF-96 型校正脉冲发生器产生,从两电缆的连接点注入,试验接线原理图见图8。由于试验使用的电缆较短,为了使结果准确有效,试验时保持各部分线路连接紧凑,并且使电缆两端线路连接和传感器位置对称。

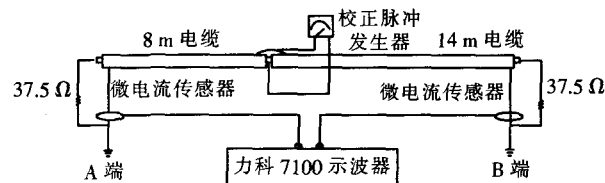


图8 试验接线原理图

3.2 试验及结果分析

由于试验不是在屏蔽室内进行,外界干扰相对比较严重,分别注入 500 pC 和 100 pC 放电量,放电脉冲的产生频率为 500 Hz,对 A、B 两端的测量结果进行分析,采用 100 M/s 的采样率,注入 500 pC 得到的两路信号的单个局部放电脉冲见图9,分别进行相关时延估计、基于小波的不同尺度时延估计、采用处理器二次加权在不同尺度上的时延估计处理,设估计点到 A、B 两端的距离差为 D , m, 处理结果见表5。从表上可以看到,在信噪比较高时,各种时延估计的结果都比较准确,与实际距离差 5.8 m,相差不大,但是在信噪比为-4.5 dB 的情况下,一般的广义相关时延估计已经无法判定,而基于小波的广义时延估计法和二次加权时延估计法却能在尺度 2^3 作出比较准确的判断,特别是二次加权的抗干扰能力较强。

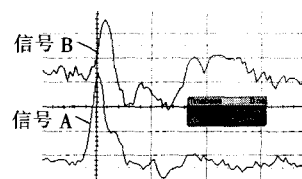


图9 两路信号中的局部放电脉冲

表5 3种时延估计算法处理结果

算法种类	注入电荷量/pC	信噪比/dB	$\hat{D}$	不同尺度距离差估计值			
				$\hat{D}_2$	$\hat{D}_4$	$\hat{D}_8$	$\hat{D}_{16}$
广义相关	500	9.5	5.7				
	100	-4.5					
小波变换	500	9.5			5.4	5.8	5.6
	100	-4.5			4.9	5.4	
二次加权	500	9.5		4.8	5.4	5.9	5.2
	100	-4.5			5.2	5.8	5.1

4 结论

通过理论和仿真实验研究,得出以下结论:

(1)研究出的基于小波变换的广义时延估计和基于小波的二次加权法时延估计算法均具有对带噪声信号进行时延估计的能力,其中,仿真得出:二次加权法具有更强的抗干扰能力,在信噪比较小时时延估计能力更强。

(2)基于小波的广义相关法在一定信噪比(-10 dB以内)时,无论信噪互不相关或互相关,均能较准确地对XLPE电缆内的局部放电进行定位。

(3)在低信噪比(如-15 dB)时,采用基于小波的二次加权法,在 2^3 、 2^4 尺度上具有较强的抗干扰能力,能较准确地对XLPE电缆内局部放电进行定位。

参考文献:

- [1] 陈巧勇,文习山,王 一,等.交联聚乙烯电缆在线绝缘检测的现状与发展[J].绝缘材料,2003(4):51.
- [2] 罗俊华,马翠姣,邱毓昌.XLPE电力电缆局部放电的在线检测[J].高电压技术,1999,25(4):32-34.
- [3] Piersol A U. Time Delay Estimation Using Phase Data[J]. IEEE. ASSP-29, 1981(3): 471-477.

- [4] FEINTUCH P L, BERSHAD N J, REED F A. Time Delay Estimation Using the LD1S Adaptive Filter-dynamic Behavior[J]. IEEE. 455P-29, 1981(3): 571-576.
- [5] YOUNG ATIMED D H, CARTER G C. On Using the LMS Algorithm for Time Delay Estimation[J]. IEEE. ASSP-30, 1982(5): 798-801.
- [6] 唐 炬,孙才新,彭文雄,等.GIS局部放电检测中的小波包变换提取信号[J].电力系统自动化,2003,28(5):25-29.
- [7] 崔雪梅,孙才新,李 新,等.实小波与复小波变换对局部放电在线监测中提取信号特征的特点研究[J].电工技术学报,2004,19(7):90-94.
- [8] 许高峰,孙才新,唐 炬,等.基于小波变换抑制GIS局部放电监测中白噪声干扰的新方法研究[J].电工技术学报,2003,18(2):87-90.
- [9] KNAPP C H, CARTAR G C. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay[J]. IEEE. ASSP-24, 1976, 32(327): .
- [10] 张贤达,保 铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [11] MASHIKIAN M S, PALMIERI F, BANSAL R, et al. Location of Partial Discharges in Shielded Cables in the Presence of High Noise[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1992, 27(1): 37-43.

(上接第388页)数,仅将工作频率根据式(6)改变为28.2 kHz,当负载电阻从小到大变化时的实验波形见图6。可以看到,此模式下负载电压恒定而负载电流变化。另外,由式(7)可知,当 $Z_L \ll X_P$ 时, $I_r \approx U/Z_L = I_L$;而 $Z_L \gg X_P$ 时, $I_r \approx U/(jX_P)$,保持恒定,这从实验波形中也可以看出。

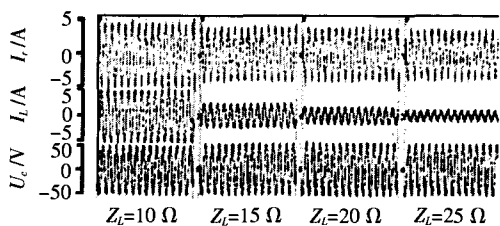


图6 LCL恒流特性实验结果

4 结语

由仿真计算和实验结果可知,LCL型谐振拓扑有

很好的恒流特性,应用于电容充电电源的研制中具有恒流特性好、电路控制简单等优点。另外,此拓扑也有很好的恒压特性,在对输出电压恒定的场合也有一定实用价值。

参考文献:

- [1] BORAGE M, TIWARI S, KOTAIAH S. Constant-current, Const-voltage Half-bridge Resonant Power Supply for Capacitor Charging[J]. IEEE Proc.-electr. Power Appl, 2006, 153(3): 343-347.
- [2] BHAT A. Analysis and Design of LCL-type Series Resonant Converter[J]. IEEE Trans. Power Electron, 1994, 9(1): 64-73.
- [3] LOIATI K, SADARNAC D. Analysis of a Resonant Converter with LCL-type Commutation[J]. Proc. 5th EPE Conference, Brighton13-16 September, 1993(3): 141-147.
- [4] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理和设计[M].北京:电子工业出版社,2004.

《电力电容器》已出版

新书介绍

《电力电容器》中文版2007年7月由机械工业出版社出版,原著由CRC/Taylor & Francis出版集团于2005年出版,作者为美国Ramasamy Natarajan博士,译者为浙江大学徐政教授。该书对电力电容器的原理和应用进行了十分系统和全面的阐述,内容包括电力电容器的基本原理、电力电容器的主要应用场合、电力电容器的保护方法、电力电容器的维护、电力电容器应用对系统的影响以及采用电力电容器进行功率因数校正的经济性分析等。书中包含大量的工程实例,可为解决实际工程问题作参考,该书适合于从事电力系统科研、规划、设计、运行的工程师与电力电容器设计、制造和应用的技术人员以及高等学校电气工程及其自动化专业的学生和教师阅读。全书335页,43万字,定价40元。

购书联系电话:010-88379639 88379641;

汇款到:北京市西城区百万庄大街22号机工书店邮购部,邮编:100037,加15%邮寄费。