

DOI: 10.7667/PSPC151112

基于奇异值分解的直流输电电压缓冲装置 DCBM10A 缓冲时间的测试方法

乔记阳, 蒋大海, 胡欢, 周绍元, 周琦, 王晓辉

(许继电气直流输电系统公司, 河南 许昌 461000)

摘要: DCBM10A 电压缓冲装置必须在规定的时间内为后继负载提供持续电能, 精确计算装置放电起止时刻非常重要。首先通过理论推理建立了电容放电的状态方程。接着介绍了 SVD 奇异值分解理论并用此理论对此方程进行了研究并计算得到了装置放电时刻。然后选取 Marr 小波用小波变换模极大值理论处理缓冲信号。对比分析了两者的结果, 体现了 SVD 理论解决此问题的优越性。最后搭建实验平台用实验证明了此方法的有效性。

关键词: 直流输电; 电容放电时间; Hankel 矩阵; 奇异性信号; SVD 分解

Testing method of buffer time to the voltage buffer device DCBM10A based on singular value decomposition

QIAO Jiyang, JIANG Dahai, HU Huan, ZHOU Shaoyuan, ZHOU Qi, WANG Xiaohui

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: DCBM10A voltage buffer device provides continuous power within the stipulated time for subsequent load, it's very important to accurately calculate discharge time. First, through theoretical deduction the capacitor discharge state equation is established. Then SVD singular value decomposition theory is introduced and the theory is used to analyze the equation, and discharge time is determined. And then Marr wavelet and wavelet transform modulus maximum theory are selected respectively to process buffer signal. The two results are analyzed and compared, which embodies SVD theory superiority. Finally experimental platform is built, which demonstrates the effectiveness of this method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: HVDC transmission project; capacitor discharge time; Hankel matrix; singularity signal; SVD decomposition

0 引言

±500 kV 观音岩直流输电工程是我国第一个省内(云南省)直流输电工程, 许继集团承建送端±500 kV 永仁换流站和受端富宁换流站的直流控制和保护系统。在该控保系统中 DCBM10A 电压缓冲装置起着重要的作用, 当发生故障断电时它能在要求的时间为后继测控装置继续提供电能从而保护整个控保系统平稳安全运行。

传统的电容放电试验测试方法是给电容器接上电压表, 将电容器充电至额定电压峰值, 打开控制开关, 然后在相关的电压值点上记录时间来实现,

文献[1]用的这种方法测试过程环节繁多, 且易受外界影响, 测试精度不高。而文献[2]一文提出的电容器放电自动检测算法仅适用于无功功率补偿装置。

而对于常规的 RC 充放电电路的充放电时间计算只要负载阻值明确, 就可以求得具体的充放电时间。而对于本装置电路虽然原理上也是关于电容放电, 但是本电路的负载电阻未知, 其负载特性仅要求了放电电压限制、最小工作电流, 缓冲时间。因此上述方法已不能用来计算放电时间必须寻找新的计算方法, 并且对于本电路的电压缓冲过程受直流电源整流过程和外界干扰会发生轻微的突变, 电容的开始放电时刻 t_1 不能准确确定, 这样就不能得到准确的放电时间。

所以寻求一种算法能够精确检测出放电时刻是本文研究的关键。奇异值分解(SVD)是一种非线性

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863 计划)(2015AA050101)资助

滤波, 广泛应用于信号检测工作中, 特别是它可以对特征信号进行重构并提取有用的信息从而可以具有奇异性检测能力^[3]。因此基于奇异值分解的信号特征提取算法为解决此问题提供了一种可能。

1 DCBM10A 电压缓冲装置的原理

该装置主要由整流充电电路、缓冲电路和保护电路组成, 其电路原理图可以简化为图 1 所示。缓冲电路由电解电容 C 、分压电阻 R_1 、负载电阻 R_2 组成。在该电路中后级负载用 R_2 代替, 负载特性是要求在整流电源 110 V 中断后, 电压下降为 $1/2U_N$ 、电流 ≥ 0.5 A 下持续工作 67 ms。

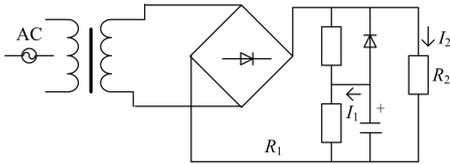


图 1 DCBM10A 电路简化图

Fig. 1 DCBM10A simplified circuit diagram

电容充放电过程也是一个能量转换的过程, 从电能与功的关系^[4]结合本装置电路可推知:

$$T = RCL_n(v_1 - v_0)/(v_1 - v_i) \quad (1)$$

$$W_0 = \frac{1}{2}cv_0^2 \quad W_1 = \frac{1}{2}cv_i^2 \quad (2)$$

$$W = W_0 - W_1 = I^2RT \quad (3)$$

将式(1)两边都成乘以 T 得

$$T^2 = RTCL_n(v_1 - v_0)/(v_1 - v_i) \quad (4)$$

由式(3)得

$$RT = W / I^2 \quad (5)$$

将式(5)代入到式(4)得

$$T^2 = \frac{W}{I^2}CL_n(v_1 - v_0)/(v_1 - v_i) \quad (6)$$

式中: W_0 为电容放电前的电能; W_1 为电容放电后的电能; W 为电容放电过程中损失的电能; I 为电路中总的电流。 $I = I_1 + I_2$, $I_1 = \frac{v_i}{R_1}$, $I_2 = 0.5$ A。

$$T^2 = \frac{W}{(0.5 + \frac{v_i}{R_1})^2}CL_n(v_1 - v_0)/(v_1 - v_i) \quad (7)$$

将式(2)、式(3)代入式(7)得

$$T^2 = \frac{0.5(v_0^2 - v_i^2)}{(0.5 + \frac{v_i}{R_1})^2}C^2L_n(v_1 - v_0)/(v_1 - v_i) \quad (8)$$

式(8)代表了缓冲时间和放电时刻电压的状态方程, 用奇异值分解原理分析此方程是本文工作的

重点。

2 Hankel 矩阵下 SVD 分解的信号特征提取原理

2.1 Hankel 矩阵下奇异值分解原理

设 X 为一长度为 N 的等间隔离散时间序列, $X=[x(1), x(2), x(3), \dots, x(N)]$ 。构建此信号的 Hankel 矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(n) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(n+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(m) & x(m+1) & \dots & x(m+n-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $1 < n < N$, $m+n-1=N$, A 为 $m \times n$ 矩阵, 秩 $r \leq n$ 。根据 Hankel 矩阵的理论可知, 存在 m 阶正交矩阵 U 和 n 阶正交矩阵 V 使得 A 可被分解为

$$A = USV^T = \sum_{i=1}^p u_i \sigma_i v_i^T = \sum_{i=1}^p A_i \quad (10)$$

式中: u_i 是方阵 AA^T 的特征向量, v_i 是方阵 $A^T A$ 的特征向量。 $S = [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p), 0]$ 或者转置, 0 为零矩阵, $p = \min(m, n)$, $\sigma_i (i=1, 2, \dots, p) > 0$, σ_i 为矩阵 A 的特征值的平方根且称为矩阵 A 的奇异值。公式(10)称为矩阵 A 的奇异值分解^[5-6]。

2.2 奇异值分解的特征值提取算法

从 Hankel 矩阵的结构可以看出, 只要将矩阵 A 的第一行的行向量 H_1 和最后一列去除 $x(n)$ 的列向量 Ln 的转置首尾相连就能重构出原始信号 X , $X=[H_1, Ln^T]$ 。如果原始信号 X 含有特异信号, 那么对矩阵 A 进行奇异值分解得到的奇异值集中反映了特征信号的分布情况。将特异信号置零, 选取特殊的特征值再进行 SVD 反变换得到感兴趣的分量信号 X_i , 再将分量信号进行简单的叠加, 从而实现特征信息的提取, 这种方法在信号的去噪和特异性检测方面有着特殊的应用^[7-8]。分量信号 X_i 的求解如下。

设 S' 为特异值置零后的对角阵, $S' = [\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k), 0]$, 则 $US'V^T = A_i$ 得到新的矩阵。

$$A_i = \begin{bmatrix} x(1)' & x(2)' & \dots & x(n)' \\ x(2)' & x(3)' & \dots & x(n+1)' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(m)' & x(m+1)' & \dots & x(m+n-1)' \end{bmatrix} \quad (11)$$

再将矩阵 A_i 的第一行的行向量和最后一列去除首元素的列向量的转置首尾相连就可得到除去了特异值的分量信号 X_i , 对新序列 X_i 进行时域或者频域分析, 就能得到原信号包含的特征信息。

3 奇异值分解的电容放电时间与验证

从上述对离散信号构建的 Hankel 矩阵进行 SVD 分解的理论分析可知, 用奇异值分解理论研究电容放电时间, 首先在电容放电过程中采样放电信号, 然后对这些放电信号进行 Hankel 矩阵构建, 并进行奇异值分解和重构分量信号。接着对分量信号进行时域分析, 找出分量信号与零水平线相交的时刻 t_1 即为放电开始时刻, 然后找出采集信号中电压 ≤ 55 V 的时刻 t_2 即为放电完成时刻, 用 t_2-t_1 可以得到放电时间 t 。

设 $V_0=105.5$ V, $V_1=0$ V, $C=660$ μ F, $R_1=110$ k Ω , 以采样频率 $f=0.1$ Hz, 采样点数 $N=8$ 对上述信号进行采样, 在 Matlab 中引用 solve() 函数计算相应的函数值, 用 ezplot() 函数作出的时域图如图 2 所示。

在波形的起始阶段看似一条水平直线实际上存在波动, 这可能是直流电源整流或者外界波动引起的。将图 2 局部放大后由图 3 可以看出, 电容电压下降的过程中受突变的影响, 图像不是一条光滑的直线。

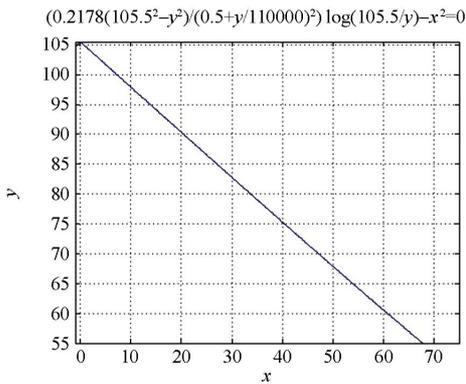


图 2 模拟奇异信号的时域图

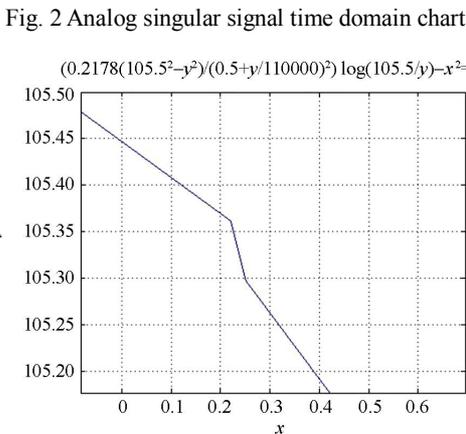


图 3 模拟奇异信号的局部放大时域图

Fig. 3 Analog singular signal fractionated gain time domain chart

按上述理论对采样信号进行处理: 首先根据 Hankel 矩阵的构建原理建立采样信号的 Hankel 矩阵, 根据采样点数设矩阵的列数为 2, 并在 Matlab 中进行 SVD 分解得到两个特征值, 保留第二个特征值并重新构建分量信号 X_2 , 如图 4 所示。

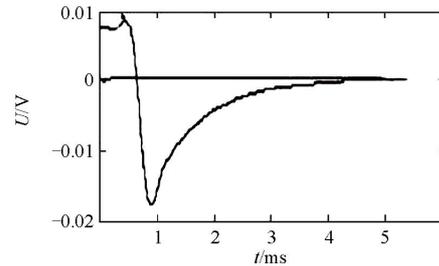


图 4 奇异值 SVD 分解处理后的分量信号 X_2

Fig. 4 Singular signal SVD resolving component signal X_2

从图 4 可以看出分量信号在接近 1 ms 时出现从正值到负值的穿越并与零水平线相交于一个点, 该点即为装置开始向后继负载供电时刻, $t_s=0.7$ ms, 而当其电压值降到 55 V 时为放电结束的时刻 $t_e=67.7$ ms, 所以放电时间 $t=t_e-t_s=67$ ms。

小波变换也是一种检测信号奇异性的常用方法, 在进行信号的检测时, 可以保存有用信号的部分和突变部分^[9]。用小波变换对电压缓冲信号进行处理, 并和 SVD 奇异性信号检测效果进行对比。选取 Marr 小波, 对原信号进行小波变换, 并取小波变换模极大值进行分析, 极值点对应信号突变点, 得到图 5 所示的时域波形, 从图得知在 0.7 ms 附近信号发生了突变, 但是此变换的起始位置没有发生明显的界限, 不能准确地对该位置进行自动捕捉, 原因在于用小波变换模极大值检测信号突变点受变换尺度的影响, 小尺度下受噪声的影响产生伪点, 大尺度下由于平滑作用使定位产生偏差。这说明了基于 SVD 分解的信号奇异性检测方法在信号奇异性检测中有一定的优越性, 也说明此检测电容放电时间算法中使用该方法是合理、可靠的。

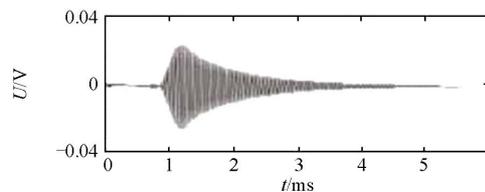


图 5 Marr 小波处理后的缓冲信号

Fig. 5 Marr wavelet processing buffer signal

在实验室搭建此电路的测试平台, 在输入端接入 AC110 V 电压, 用阻值 200 Ω 的滑动变阻器等效负载, 并在输入端和输出端分别用示波器监视电压

变化的情况, 实验结果如图 6 所示。从实验结果可以看出当电压从 110 V 到 55 V 用时约 67 ms, 这与上述的研究结果一致。

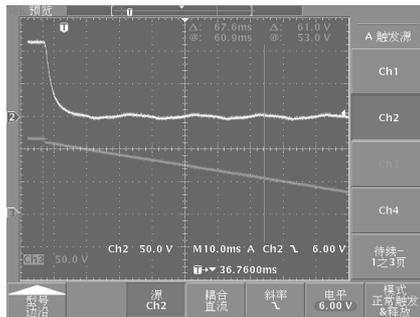


图 6 实验结果验证图

Fig. 6 Experimental results

因此可见经过奇异值分解处理, 可以准确地计算出电容放电时间, 这样为此产品的研发提供了一种新的理论手段, 在开发过程中对电路的设计、器件的选型、参数冗余度的选择上可以更加清晰、有的放矢。并且还可以结合程序语言设计出一种自动测试电容放电时间的软件用于产品的升级改造, 使产品更加优化和智能, 使装置在建设坚强的特高压直流输电工程中提供更好的保障。

4 结束语

DCBM10A 电压缓冲装置在直流控制保护系统中起着向后级负载提供电能, 从而确保了后级负载在规定的时间内平稳运行, 因此电压缓冲时间的设计至关重要, 本文提出了一种基于特征值分解的奇异性检测方法, 详细阐述了此方法的理论特点, 设计出了基于此方法的检测算法, 并与实验室实际的测试数据进行了对比, 结论证明了此方法的有效性, 此外此方法可以扩大应用到其他测算电容放电时间的场合中, 有一定的推广价值。

参考文献

[1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15576-2008 低压无功功率补偿装置[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China GB/T 15576-2008 low-voltage reactive power compensation assemblies[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.

[2] 曾作钦, 陈金汕, 余以周. 一种电容器放电时间自动检测算法及其应用[J]. 电气制造, 2013(6): 56-59.
ZENG Zuoqin, CHEN Jinshan, YU Yizhou. Automatic detection algorithm for discharge time of capacitor and its

application[J]. Electrical Manufacturing, 2013(6): 56-59.

[3] 向强铭, 王茜, 陈靖秋, 等. 基于奇异值分解理论的双端行波故障测距的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 14-18.
XIANG Qiangming, WANG Qian, CHEN Jingqiu, et al. Study of two terminal traveling wave fault location on SVD theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 14-18.

[4] 李瀚荪. 电路分析基础(中册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[5] 王益艳. 基于特征均值的 SVD 信号去噪算法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(5): 121-123.
WANG Yiyen. Mean value of eigen value based SVD signal denoising algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(5): 121-123.

[6] 吴浩浩, 罗志增. 基于构造 Hankel 矩阵的 SVD 陷波方法[J]. 计算机应用研究, 2012, 27(12): 4514-4516.
WU Haohao, LUO Zhizeng. Signal notch method based on Hankel matrix and SVD[J]. Application Research of Computers, 2012, 27(12): 4514-4516.

[7] 王振浩, 姚艳菊, 陈继开. 基于 SVD 方法的多台配电网静止无功补偿器交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 103-109.
WANG Zhenhao, YAO Yanju, CHEN Jikai. Interactions analysis of multiple DSVC controllers based on SVD method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 103-109.

[8] 王韶, 江卓翰. 基于奇异值分解和等效电流量测变换的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 111-115.
WANG Shao, JIANG Zhuohan. Power system state estimation based on singular value decomposition and equivalent current measurement transformation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 111-115.

[9] 李龙云, 彭玉华. 小波变换极大值域的一种自动滤波算法的实现[J]. 信号处理, 2003, 19(增刊): 53-56.
LI Longyun, PENG Yuhua. A realizing method of automatic filtering algorithm in the domain of WT coefficient maxima[J]. Signal Processing, 2003, 19(S): 53-56.

收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-09-16

作者简介:

乔记阳(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压直流输电研究和开发工作; E-mail: qjynuli@126.com

蒋大海(1983-), 男, 本科, 工程师, 主要从事高压直流输电研发和设计工作;

胡欢(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压直流输电研发和设计工作。

(编辑 周金梅)