

一种基于扰动能量与功率谱的电容器组投切的定位方法

邓扶摇¹ 赵静¹ 万力² 郭亮¹

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 成都电业局, 四川 成都 610061)

摘要: 由于部分无功补偿装置本身的不成熟, 容易产生误动现象, 因此定位多条母线处的投切电容器组具有重要意义。以2条母线处电容器同时投切为研究对象, 提出了一种利用扰动能量与功率谱作为特征, 支持向量机作为智能分类器的定位方法。该方法首先使用扰动能量第一峰值的极性及其大小, 判断电容器投切的主要区域; 接着对区域内部分监测点的监测电压进行功率谱估计, 计算所提出的2个特征指标; 最后将这些特征量输入支持向量机, 得到电容器投切的位置。在PSCAD/EMTDC中建立了简单配电网模型, 仿真不同位置的电容器投切, 测量母线电压暂态数据, 所得数据导入Matlab进行处理, 仿真结果表明, 该方法对判定两两同时投切电容器组的位置具有较好的适应性, 平均识别精度达到98.6%。

关键词: 电容器投切; 暂态电能质量; 定位; 扰动能量; 功率谱

Abstract: Due to the imperfect of some reactive compensation installations, the misoperation is prone to occur, thus, locating the switching capacitor bank on multiple buses has the great significance. An efficient location method on two different buses in distribution system is presented using disturbance energy (DE) and power spectrum (PS) as the features and support vector machine (SVM) as intelligent classifier. In this method, firstly, the numerical value and polarity of DE are utilized to determine main area of capacitor switching; then, the PS of voltages from the partial measurement points are estimated and two self-proposed feature indices are calculated; finally, the location of capacitor switching can be obtained by inputting the feature indices into SVM. A simple distribution network model is established in PSCAD/EMTDC, then, the transient bus voltage are measured by simulating the capacitor switching at different locations, and the output signals are put into Matlab for processing. The results show that the proposed method has a good adaptability for locating switching capacitor bank on two different buses, whose average accuracy reaches 98.6%.

Key words: capacitor switching; transient power quality; location; disturbance energy; power spectrum

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0014-06

0 引言

众所周知, 电力系统中电容器的投切会造成一些线路电压或电流的高频暂态或过电压^[1], 影响电能质量的品质, 损害敏感器件, 因此人们对电容器投切所造成的电能质量问题日益关注。但由于目前智能无功补偿装置没有可参照的国家或行业标准, 且各厂家的产品也存在质量上的参差不齐, 这就使得产品上线运行时会出现误动、拒动等现象。一般来说, 电网中补偿装置的投切时间基本是固定的, 正常情况下很难出现多条母线处的电容器组同时投切^[2], 但考虑到电容器组的误动, 研究多条母线处的电容器组同时投切的定位方法, 有助于操作人员

及时掌握补偿装置的情况, 尽快排查有问题的装置, 保证电网的安全运行, 具有重要的现实意义。

目前研究集中在单一电容器组投切的分析定位上, 如文献[3]分析总结了电容器投切时产生暂态的各种规律, 文献[4]总结了定位电容器投切的4条较为经典且应用广泛的指标: 扰动能量变化、扰动能量的最大负偏移率、扰动功率的初始峰值与最大峰值。后续多篇文献在其基础上进行了改进完善, 如文献[5]采用扰动电压的能量和节点电压及支路电流的相角变化来定位投切电容器; 文献[6]利用扰动能量、功率流向以及扰动功率的初始峰值来定位电容器组位于监测的哪一侧。文献[7]利用卡尔曼滤波器求取监测点的初始暂态电压峰值以及第一个正负极值的差值作为特征进行定位, 此方法对某

些不确定的负荷状况及电容器状态也有一定的适应性。文献[8]利用电容器投切造成的电压和电流的暂态能量以及持续时间作为定位电容器投切扰动源位置的特征量,再使用神经网络作为分类器对3个位置的投切电容进行了定位研究,效果较好。文献[9]和[10]都采用了小波变换和扰动功率方向结合的方法来定位投切电容器,如果保证在电网中有足够多的信息来源,此法可以有效地检测电容器投切的位置。

以上所取得的研究成果较好地推动了电容器投切源定位的研究,但上述文献有一个共同的特点,即均针对的是单一电容器组的投切研究,出现多条母线上的电容器组同时投切时,上述方法能否适用还有待研究,因此下面以两处电容器组同时投切为主要研究对象,进行电容器组投切的定位研究。所采用的算法分为3步,首先根据扰动能量的第一峰值极性以及大小确定电容器投切的大致范围,再提取范围内的监测信息,计算基于功率谱的2个指标,最后将指标值输入分类器进行分类,得出最终结果。

1 基本理论

1.1 扰动能量^[4]

定义三相瞬时无功功率 $ip_{3\phi}$ 如式(1)所示,其中 $v_a(t)$ 、 $v_b(t)$ 、 $v_c(t)$ 、 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为三相电压、电流的瞬时值。

$$ip_{3\phi}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (1)$$

则扰动功率 DP 为

$$DP(t) = ip_{3\phi}(t) - ip_{ss}(t) \quad (2)$$

其中 $ip_{ss}(t)$ 表示扰动前的正常稳定状态。

由扰动功率可以得到扰动能量 DE 的表达式为

$$DE(t) = \int DP(t) dt \quad (3)$$

实际计算中,积分范围可取一个信号周期。

1.2 现代谱估计

现代谱估计^[11]的提出是为了解决经典谱估计方差大、分辨率低的缺点,它可以减小周期图法带来的偏差,改善功率谱曲线的光滑性。现代谱估计又包括模型参量法(AR模型、MA模型、ARMA模型等)、非参量谱估计法(最小方差法、特征矢量法等)、熵谱估计法、多谱多维谱估计法等。其中AR

模型属于全极模型,是目前研究较多、应用较好的方法。因此,下面将采用AR模型进行功率谱估计,并利用Burg法求解。

假定所研究的平稳过程 $x(n)$ 是由一白噪声序列 $u(n)$ 激励一线性系统所产生的输出,有

$$\begin{aligned} x(n) &= - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^p b_k u(n-k) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} h(k) u(n-k) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 p 为信号阶数;AR模型是假设 $b_1, b_2, \dots, b_q = 0$, 且 $b_0 = 1$ 。

则式(4)可写为式(5)。

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (5)$$

$x(n)$ 的自相关函数 $r_x(m)$ 为式(6)所示,其中 σ^2 为方差。

$$r_x(m) = \begin{cases} - \sum_{k=1}^p a_k r_x(m-k) & m \geq 1 \\ - \sum_{k=1}^p a_k r_x(k) + \sigma^2 & m = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Burg算法是通过迭代使得前、后向预测误差的平均功率 p_m 最小,进而估计出功率谱。定义 m 阶前、后向预测误差为

$$\begin{aligned} f_m(n) &= \sum_{k=0}^m a_m(k) x(n-k) \\ g_m(n) &= \sum_{k=0}^m a_m^*(m-k) x(n-k) \end{aligned} \quad (7)$$

前、后向预测误差的阶数递推公式有

$$\begin{aligned} f_m(n) &= f_{m-1}(n) + K_m g_{m-1}(n-1) \\ g_m(n) &= K_m^* f_{m-1}(n) + g_{m-1}(n-1) \end{aligned} \quad (8)$$

定义前、后向预测误差的平均功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \sum_{n=m}^N [|f_m(n)|^2 + |g_m(n)|^2] \quad (9)$$

其中 K_m 如式(10)所示, N 为分析信号长度。

$$K_m = \frac{-2 \sum_{n=m+1}^N f_{m-1}(n) g_{m-1}^*(n-1)}{\sum_{n=m+1}^N [|f_{m-1}(n)|^2 + |g_{m-1}(n-1)|^2]} \quad (10)$$

1.3 支持向量机

SVM是建立在VC维理论和结构风险最小原理基础上的模式识别方法,其基本思想^[12]如下。

(1) 线性情况

考虑线性可分二分类问题,设训练集为

$$T = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\} \in (X \times Y)^n \quad (11)$$

其中 $x_i \in X = R^n$, $y_i \in Y = \{+1, -1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 问题线性可分表明存在分类超平面

$$(W \cdot X) + b = 0 \quad (12)$$

使训练集中的正类输入与负类输入分别位于该平面的两侧。

则最优超平面的判别函数为

$$y(x) = \text{sgn}(W \cdot X + b) \quad (13)$$

其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。最优超平面的求解需要最大化 $2/\|W\|$, 即最小化 $\frac{1}{2}\|W\|^2$ 。

当样本为线性不可分时, 只需引入非负松弛因子 ξ_i , $i = 1, 2, \dots, n$, 并求解式(14)即可。

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \text{ s.t. } y_i (W \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad (14)$$

其中 $\xi_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$; C 为惩罚参数, C 越大表示对错误分类样本的惩罚越大。

(2) 非线性情况

当训练样本为非线性时, 可通过非线性函数 $\phi(X)$ 将训练样本映射到高维线性特征空间, 并在此空间中构造最优分类超平面, 得到分类器的判别函数。此时分类超平面为

$$W \cdot \phi(X) + b = 0 \quad (15)$$

判别函数为

$$y(X) = \text{sgn}(W \cdot \phi(X) + b) \quad (16)$$

则最优分类超平面问题可描述为

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \text{ s.t. } y_i (W \cdot \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (17)$$

其中 $\xi_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。求解式(17)时, 一般会化为其对偶最优化问题。

2 简单配电网模型

图 1 为所采用的简单配网模型, 线路长度见表 1。假设线路上安装有 8 个监测装置, 采样频率 10 kHz。安装的补偿装置 3 个, 分别为 M1 与 M3 之间 (C1)、M3 与 M4、M5 之间 (C2)、M4 与 M7 之间 (C3)。共有 6 种投切情况: C1、C2 或 C3 单独投切, C1/C2、C2/C3 或 C1/C3 两两同时投切。

3 算法描述

所提出的算法分为 3 个步骤, 首先考察各监测

点的扰动能量第一峰值及大小, 判断电容器投切的大致范围; 接着估计此范围内监测点信息的功率谱, 计算自定义的 2 个指标, 获得用于分类的特征向量; 最后将特征量输入 SVM, 得到分类结果。

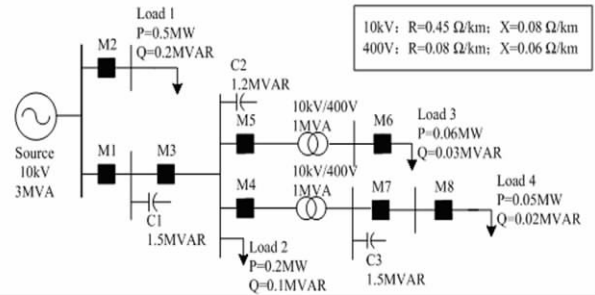
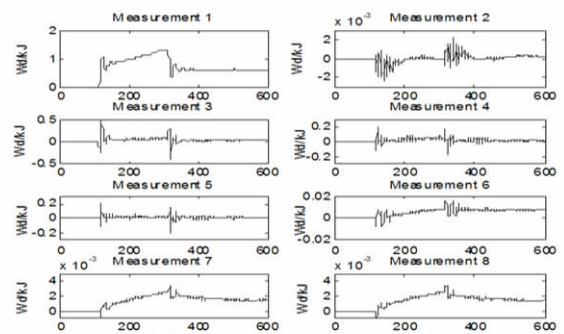
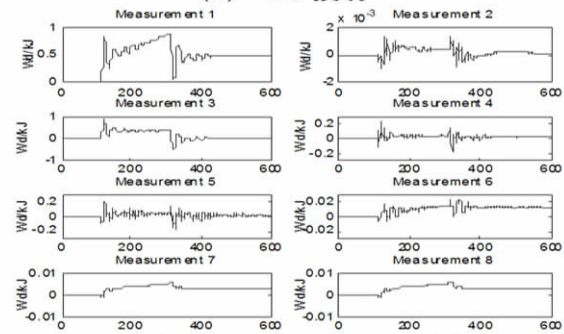


图 1 简易配电网模型

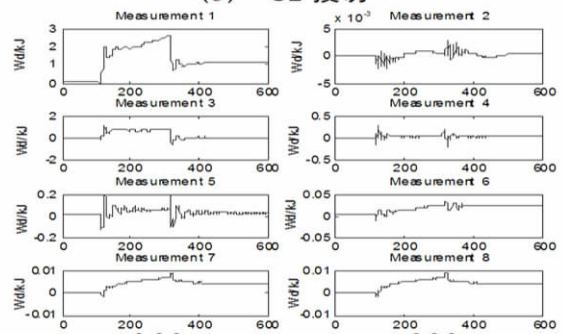
(1) 利用扰动能量的第一峰值极性 (DEP) 及扰动能量大小 (DE) 判断电容器所在线路以及覆盖区域。



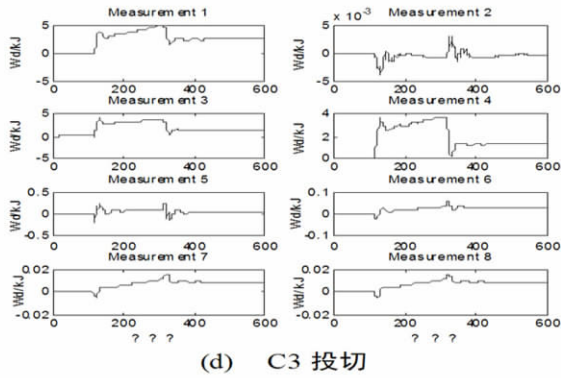
(a) C1 投切



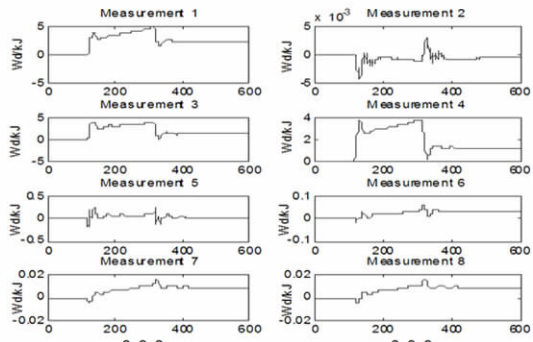
(b) C2 投切



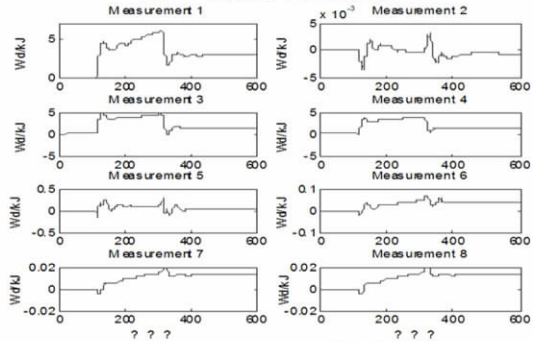
(c) C1/C2 同时投切



(d) C3 投切



(a) C1/C3 同时投切



(b) C2/C3 同时投切

图2 各种投切情况下的扰动能量

对各监测信息进行扰动能量的计算,得到电容器组不同投切情况下的扰动能量如图2所示。如图3所示定义扰动能量第一峰值极性,则扰动能量的峰值极性统计如表2所示。

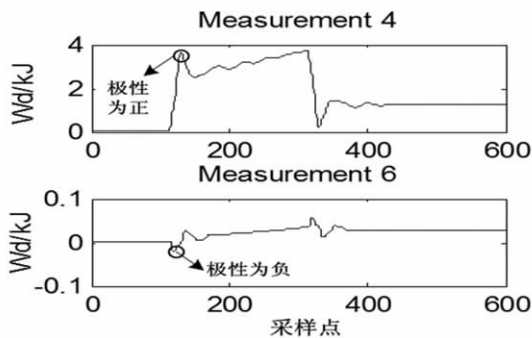


图3 扰动能量第一峰值极性

表1 线路长度

项目	长度/km	项目	长度/km
Source - M1	2.5	M3 - M5	2
Source - M2	4	M4 - M7	1.5
M1 - M3	2	M7 - M8	1.5
M3 - M4	2	M5 - M6	1.5

表2 扰动能量第一峰值极性统计

投切电容	测量点							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C1	+	-	-	-	-	-	-	-
C2	+	-	+	-	-	-	-	-
C3	+	-	+	+	-	-	-	-
C1/C2	+	-	+	-	-	-	-	-
C1/C3	+	-	+	+	-	-	-	-
C2/C3	+	-	+	+	-	-	-	-

注: +表示极性为正,-表示极性为负

由图2与表2,可以看出以下规律。

1) 根据线路的拓扑结构以及各监测点DE的大小对比可以知道,虽然M1与M2监测点的 DE_p 相反,但M2处监测到的信息非常微弱,完全可以认为M2是位于非电容器投切支路,因为扰动发生线路最末段的监测点监测到的DE都比M2强。因此,根据拓扑结构及DE可以初步判断扰动发生在那条支路。

2) C1投切时 DE_p 与其他情况均不一致(如图2(a));C2或C1/C2同时投切时 DE_p 完全一致(如图2(b)~图2(c));C3、C1/C3或C2/C33种情况投切时 DE_p 完全一致(如图2(d)~图2(f));因此,可以认为如果监测到某两监测点处的 DE_p 反向,则可推断出扰动是跟该点投切电容器及其前向电容器组有关。

3) 仅由DE与 DE_p 只能初步判断出电容器大致投切的区域,不能完全确定到底是哪一些位置的电容器进行投切。因此还需要在确定初步范围后,对扰动暂态信息进行进一步的特征提取,以便最终位置的确定。

综上所述,通过第一步可以判断为:C1投切;投切范围包括C2;投切范围包括C3。如果是情况2,即投切范围包括C2,则进一步对M1、M3、M4监测到的信息进行特征提取;如果是情况3,即投切范围包括C3,则进一步对M1、M3、M4、M7监测到的信息进行特征提取。

通过第一步的主要投切区域判断,可大大减小监测信号的处理量。此步骤对小系统的影响或许不

大,但对于拓扑结构更为复杂的大系统来说,仅对部分监测点的信息进行特征提取,不但可以减小算法计算量,更可节省存储空间。

(2) 计算基于功率谱的特征指标 R_{pow} 与 D_{pow}

在进行功率谱估计之前,先对三相信号进行模变换^[8],将三相电压信息综合到一个信号上,模变换公式为

$$\dot{u} = u_a + 2u_b - 3u_c \quad (18)$$

其中 u_a, u_b, u_c 为三相瞬时电压,下面的谱估计对象均为 \dot{u} 。

1) AR 阶数的确定

采用 AR 模型辨识的现代谱估计方法对信号进行特征提取,此法最重要的是确定 AR 阶数。图 4 所示为 AR 阶数为 5、50、500 时估计的功率谱,从图中可以看出,阶数过低 ($order = 5$),谱线显得不明显,阶数过高 ($order = 500$),会出现虚假谱峰,因此,AR 模型的阶数需妥善选择。

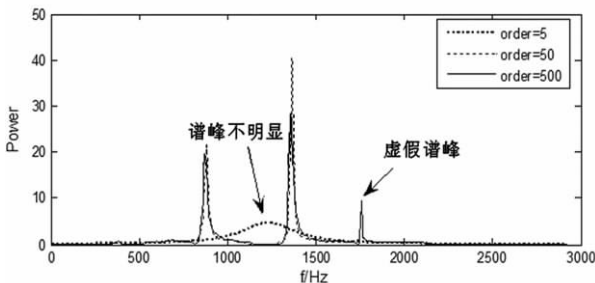


图 4 不同 AR 阶数的功率谱估计

目前 AR 阶数的确定^[11]有如下几种方法:信息量准则法(FPE 最终预测误差法、AIC 准则法及其改进算法等)与线性代数准则法(行列式检验算法、Gram-Schmidt 正交法、SVD 奇异值分解法等)。采用 SVD 法确定 AR 模型的阶数,具体计算步骤请见文献[11]。

2) 指标计算

确定好 AR 阶数后,对监测点采样到的信号进行功率谱估计。下面以 M1 监测点为例,说明基于功率谱的特征指标应该如何计算。图 5 所示为各种扰动投切情况下, M1 监测点信号的功率谱,图 6 为功率谱的谱峰示意图。

查找功率谱的谱峰,选择值最大的 2 个谱峰,按照其所处位置的前后,定义为峰值 1 与峰值 2,计算式(15)、式(16)所示指标。

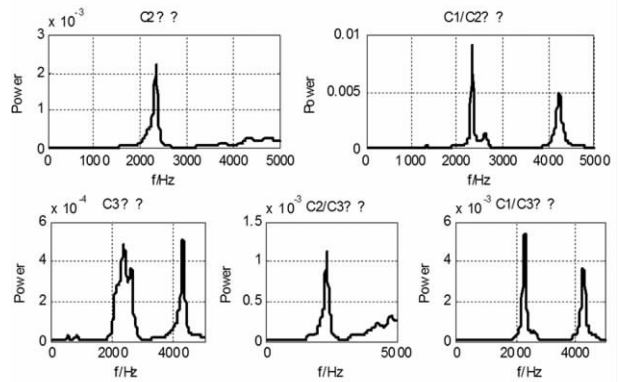


图 5 各种投切情况的功率谱估计

注:这里的功率谱估计均滤去了 50 Hz 工频信号,只留下高频暂态扰动。

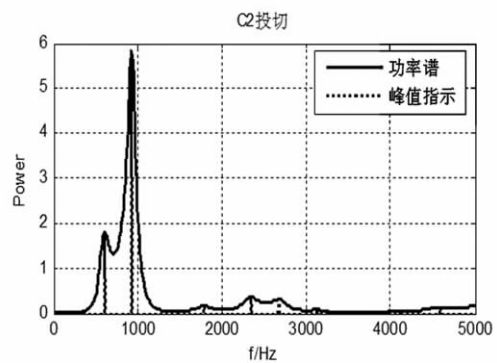


图 6 谱峰示意图

指标 1: 峰值 1 与峰值 2 的比值。

$$R_{pow} = \frac{V_{pow}(\text{峰值 1})}{V_{pow}(\text{峰值 2})} \quad (19)$$

指标 2: 峰值 1 与峰值 2 之间的归一化距离

$$D_{pow} = \frac{P_{pow}(\text{峰值 2}) - P_{pow}(\text{峰值 1})}{f_s/2} \quad (20)$$

其中, $V_{pow}(\cdot)$ 表示功率谱峰值的大小; $P_{pow}(\cdot)$ 表示功率谱峰值所在的位置; f_s 是采样频率。指标 1 中涵盖了信号幅值的信息,指标 2 则涵盖了信号频率的信息。

由于这一步得出的指标值并不具有严格的规律,无法利用规则推理或设定阈值等简单方法实现分类,只能借助支持向量机这种智能分类算法来实现电容器的定位。

(3) 算法流程

以图 1 所示系统为例,对上述算法做一个总结,得到图 7 所示的算法流程。

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中,建立如图 8 所示的线路

模型,利用 Multiple run 元件进行多次仿真。在一个信号周期内不改变投切电容的大小,只改变电容器投切的时间,每种投切情况生成 300 组样本,随机选择 100 组作为训练样本,剩下 200 组作为测试样本。下面给出效果较好的几组识别情况,如图 8、图 9 所示。

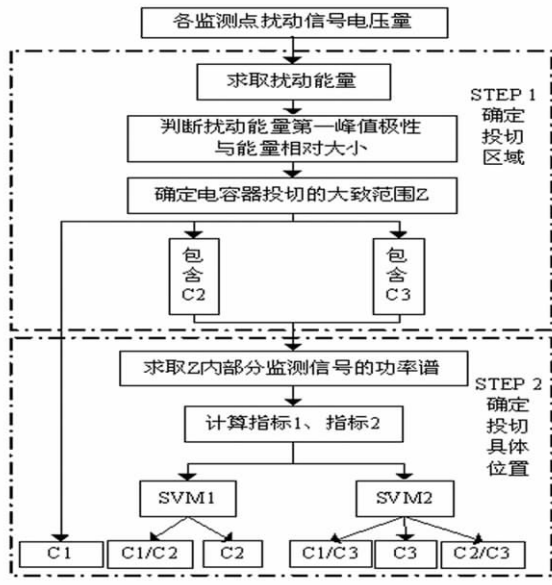


图7 算法流程图

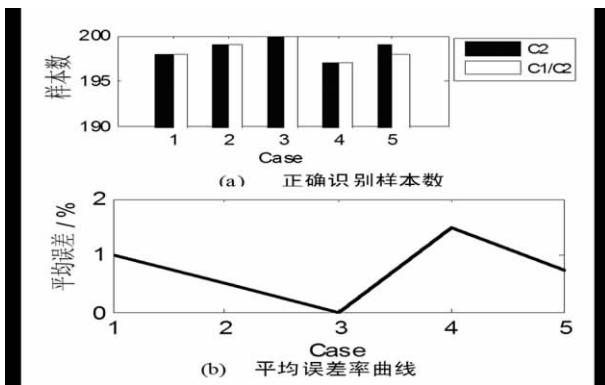


图8 SVM1 识别结果

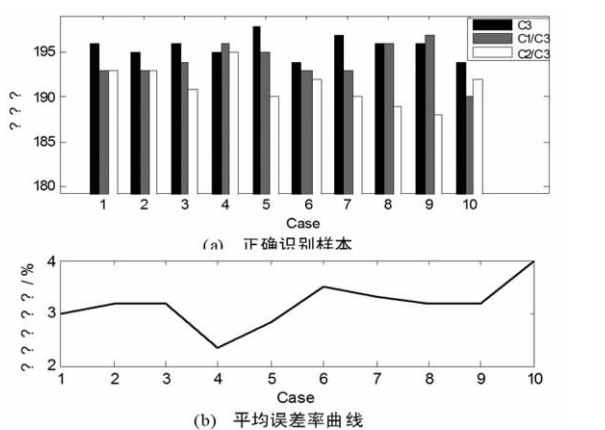


图9 SVM2 识别结果

表3中给出识别效果最好的一组结果。如表3所示,所提出的方法效果较为理想,平均识别率最高可以达到98.6%。

表3 测试结果

类别	C2	C1/C2	C3	C1/C3	C2/C3
C2	200	0	/	/	/
C1/C2	0	200	/	/	/
C3	/	/	195	3	3
C1/C3	/	/	0	196	2
C2/C3	/	/	5	1	195
正确率	100%	100%	97.5%	98%	97.5%
平均正确率	98.6%				

5 结 语

通过对两两投切的电容器组的定位研究,提出了基于扰动能量及功率谱指标的定位方法,通过仿真分析,得出了以下结论。

- (1) 单靠扰动能量的极性与大小不能判断多个电容器组同时投切的位置,需结合其他手段。
- (2) 通过第一步大致投切区域的判断,可以有效减小算法计算量与信息存储空间。
- (3) 所提出的方法具有较好的适应性,平均识别率最高可达到98.6%。
- (4) 但所提出的方法局限于某一固定拓扑线路,如需用于新的线路,则需要根据新线路拓扑重新训练分类器。

参考文献

- [1] Aaron Kalyuzhny, Silviu Zissu, Member and Dan Shein. Analytical Study of Voltage Magnification Transients Due to Capacitor Switching [J]. IEEE Trans. Power Del., 2009, 24(2): 797-805.
- [2] Ying-Yi Hong, BO-Yuan chen. Locating Switched Capacitor Using Wavelet Transform and Hybrid Principal Component Analysis Network [J]. IEEE Trans. Power Del., 2007, 22(2): 1145-1152.
- [3] Saied, M. M. On the analysis of Capacitor Switching Transients [C]. International Conference on Power System Technology, Proc. PowerCon 2002, 1(1): 134-138.
- [4] Parson, Y. A. C., W. M. Grady, E. J. Powers, et al. Rules for Locating the Sources of Capacitor Switching

(下转第31页)

应用时域仿真的方法,主要分析了普通异步风力发电机和双馈风力发电机风电场接入新疆某地区电网的暂态电压稳定性,得到了以下结论。

1) 在相同扰动情况下,短路容量大的系统其抗扰动的能力更强,即其暂态电压更稳定。特别是在风电场的选址时要注意,尽量使得 PCC 处的系统短路容量大。

2) 双馈风力发电机组能够通过转子变频器进行无功电压调节控制,在相同故障切除时间下,其暂态电压稳定极限功率 P_{CR} 比普通异步风力发电机组更大,所以其暂态电压更稳定,对扰动时的电压调节能力更强,有利于地区电网的电压稳定。

参考文献

[1] Erlich, U. Bachman. Grid Code Requirement Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany [J]. IEEE Engineering Society General Meeting (USA), 2005: 784 - 789.

[2] Friedrich W. Koch. Simulation and Analysis the Interaction of Wind Turbine and Power System [D]. Duisburg - Essen University of Germany, 2005: 27 - 52.

[3] P. Sorensen, A. D. Hansen. Reduced Models of Doubly Fed Induction Generator System for Wind Turbine Simulation [C]. Proc. Power Engineering Society Summer Meeting, Jul. 1999: 794 - 799.

[5] G. W. Chang, M. H. Shih, S. Y. Chu, et al. An Efficient Approach for Tracking Transients Generated by Utility Shunt Capacitor Switching [J]. IEEE Trans. Power Del. 2006, 21(1): 510 - 512.

[6] A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers, et al. A DirectionFinder for Power Quality Disturbance Based upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans. Power Del. 2000, 15(3): 1081 - 1086.

[7] J. Kim, W. M. Grady, A. Arapostathis, et al. A Time Domain Procedure for locating Switched Capacitors in Power Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power Del. 2002, 17(4): 1044 - 1049.

[8] Ahmed E. B. Abu - Elanien and M. M. A. Salama. Wavelet - ANN Technique for locating Switched Capacitors in Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power

tions [J]. Wind Energy, 2006(9): 299 - 311.

[4] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14 - 17.

[5] 张瑞明, 张新燕, 陈莉. 风电场接入系统后的暂态特性研究 [J]. 电气自动化, 2011, 33(2): 45 - 49.

[6] 邢文琦, 晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究 [J]. 电网技术, 2009, 33(7): 99 - 102.

[7] 张瑞明, 张新燕. 基于普通异步风力发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2011, 35(1): 175 - 180.

[8] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins. Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines. Electric Power Systems Research 67(2003): 207 - 215.

[9] 潘文霞. 大型风电场电压稳定性分析与控制研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.

[10] 吴捷. 风力发电系统的建模、控制及仿真研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2004.

[11] 李建丽. 大型风电场并网对电力系统电压稳定性的影响 [D]. 青岛: 青岛大学, 2007.

作者简介:

张瑞明(1985),男,硕士研究生,研究方向为风力发电及并网技术,主要从事电气设备实验研究。

(收稿日期: 2012 - 03 - 20)

(上接第 19 页)

Del. 2009, 24(1): 400 - 409.

[9] 王继东, 王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 20 - 23.

[10] 张凯, 关根志, 张海龙. 用小波变换和瞬时功率定位电能质量扰动源 [J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 573 - 577.

[11] 张贤达. 现代信号处理(第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 90 - 93, 111.

[12] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 166 - 190.

作者简介:

邓扶摇(1983),女,从事电网调度自动化工作;
赵静(1982),女,博士,研究方向为电网调度自动化;
万力(1981),男,硕士,从事电力营销工作;
郭亮(1982),男,硕士研究生,从事电网调度自动化工作。

(收稿日期: 2012 - 08 - 20)