

# 抽水蓄能机组继电保护配置研究

王 昕, 井雨刚, 王大鹏, 苏文博

(山东电力研究院, 山东 济南 250002)

**摘要:** 阐述了抽水蓄能机组对继电保护的要求, 介绍了目前蓄能电站的典型保护配置方案及各种配置方案的优缺点。分析了不同蓄能机组保护在电气换相问题所采用的各种策略。针对抽水蓄能机组的发电机、主变压器差动保护在可靠性、保护范围配合、闭锁逻辑等方面进行探讨。最后, 对抽水蓄能电站保护设计中存在的普遍问题进行分析、总结。

**关键词:** 抽水蓄能; 继电保护; 背靠背启动; 差动保护; 闭锁逻辑

## Research on configuration of protective relay for pumped storage power plant

WANG Xin, JING Yu-gang, WANG Da-peng, SU Wen-bo

(Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

**Abstract:** This paper specifies the requirements for protective relays applied to a pumped storage power unit. Typical protection configuration schemes are introduced and their advantages and disadvantages are discussed as well. Furthermore, the techniques used by protection system to cope with phase reverse phenomenon in pumping operation are summarized. In addition, the reliability, protection scope cooperation and block logic of differential protection for generator and main transformer of a pumped storage unit are analyzed. Based on field commissioning experience, several design issues affecting protective relays are emphasized and analyzed.

**Key words:** pumped storage power plant; protective relay; back to back start-up; differential protection; block logic

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)24-0066-05

## 0 引言

近年来, 核电及大容量机组建设对电网调峰提出了新的要求。抽水蓄能电站对电网负荷的峰谷调节、事故备用和所产生的经济效益已得到越来越多的重视。自 20 世纪 90 年代以来, 我国加大了对抽水蓄能电站的建设力度, 引进西方先进设备, 一批具有国际先进水平的抽水蓄能电站先后建成并投入运行。随着我国自动化设备和一次设备制造水平的提高, 以安徽响水涧电站为代表的多个国产化抽水蓄能机组正在建设中。

蓄能机组具有运行工况多且转换频繁的特点, 除发电运行工况外, 蓄能机组还有发电调相、抽水调相、抽水运行、电气制动、变频启动、背靠背启动等多种工况。抽水工况运行时, 发电机作为电动机运行, 转子反向旋转, 电压、电流相序与发电工况相反。另外, 由于蓄能机组较常规发电机组增加了抽水启动装置、启动母线、换相刀闸、电气制动开关等一次设备, 一次电气接线复杂。蓄能机组的上述特点对发变组保护提出了新的要求。

## 1 抽水蓄能机组对继电保护的要求

### 1.1 逻辑运算及组态功能

抽水蓄能机组有多种运行工况且转换频繁, 不同工况下要求所投入保护不同。例如, 电气制动过程中, 为防止发电机差动保护动作, 要求发电机差动要可靠闭锁, 同时低频过流保护应投入运行。因此, 抽水蓄能机组保护应具有基本的逻辑运算和灵活的组态功能, 能对工况信号进行逻辑运算, 其结果可用来控制保护的投退、定值切换或保护跳闸出口的开放、闭锁。保护闭锁逻辑与一次电气系统接线、保护装置特性、保护配置、顺控逻辑等因素密切相关, 不同抽水蓄能电站的保护闭锁逻辑和其实现方法也不同。

### 1.2 保护相序设置

抽水工况运行时, 发电机通过换相刀闸与系统换相连接<sup>[1]</sup> (例如, 系统 ABC 三相分别与发电机 ACB 连接, 本文假定换相连接均为 BC 换相), 发电机作为电动机运行, 其转子反向旋转, 机组正常运行时的电压、电流相序为逆时针方向与电网相反, 此时的机组保护应能调整为同步电动机保护, 其相

序应与机组在抽水工况运行的一次相序一致, 否则保护的序分量计算将会出现错误, 保护将不能正常工作。

对保护范围包含换相刀闸的差动保护应考虑抽水工况换相对其产生的影响。抽水工况运行时, 差动保护的差流计算应根据实际一次连接情况做相应调整, 即系统 ABC 三相分别与发电机 ACB 分别计算差流。因此, 在每次换相刀闸合于不同位置时, 差动保护的电流通道应做相应调整以保证差流、制动电流的正确计算。

### 1.3 交流量的低频采样

抽水启动和电气制动停机时都存在着低频区。抽水启动一般以变频启动为主, 两台机组之间背靠背启动为辅的启动方式<sup>[2]</sup>。被启动机组先加励磁, 然后其转速逐步上升。而电气制动时, 通过合上机端制动开关, 控制发电机励磁, 利用发电机出口三相短路来减少转速下降的时间。

对于常规机组保护, 随着发电机转速、频率的下降保护采样误差明显增大, 如图 1 所示。由于采样的幅值、相位误差变大, 保护计算的负序电流也将增大。在这种情况下, 常规机组保护将不能正常工作甚至引起误动。因此, 抽水蓄能电站在设备选型时宜选用具有频率自适应功能的保护装置和低频传变特性好的电压、电流互感器。

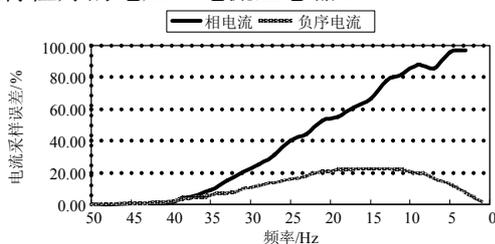


图 1 保护采样误差与频率关系

Fig.1 Sample error in relation with frequency

## 2 蓄能机组保护典型配置方案<sup>[3-4]</sup>

抽水蓄能机组保护配置与保护装置的性能密切相关, 因保护装置选型不同, 保护配置方案差异很大。

### 2.1 常规机组保护装置配置方案

常规机组保护主要用于火力或水力发电厂的同步发电机, 保护装置内部默认相序为顺时针方向, 交流采样、谐波等算法一般基于工频 50 Hz, 且允许频率上下波动的范围较小。

常规机组保护应用于抽水蓄能机组时, 通常配置四套保护(双重化配置), 两套为发电工况下的机组保护, 两套为抽水工况下的保护。发电工况与

抽水工况保护的投退闭锁可用监控系统的工况信号或换相刀闸的辅助接点来实现。为了解决抽水工况的电气换相影响, 电压、电流互感器的二次回路经换相后接入抽水工况保护。另外, 对于抽水启动等工况的低频过程, 需配置低频过流保护。

因需要为抽水工况额外配置两套保护, 保护的硬件投资为常规机组保护的两倍。电压、电流互感器二次回路进行大量串、并和换相连接, 回路接线复杂。由于保护没有换相等其他逻辑, 只有简单的保护投退控制, 保护逻辑相对简单, 运行较为可靠。

### 2.2 发电/电动机保护装置配置方案

发电/电动机保护既能应用于发电机也能用于大型同步电动机。保护装置通过自动跟踪交流量的频率变化, 保证在较广的频率范围内正常运行, 如西门子公司生产的 7UM62 保护装置。保护的相序可根据工况信号自动改变以适应抽水运行工况。因同一套保护装置即能用于发电工况又能用于抽水工况, 所以在硬件配置上与常规机组保护没有明显区别。通常, 该类保护逻辑复杂, 对于不同厂家的保护装置其逻辑实现差异很大, 因而保护的可靠性也因逻辑的实现的不同而不同。

## 3 蓄能机组保护换相方法

目前常用的方法主要有以下三种。

### 3.1 二次回路换相

如图 2 所示, 当机组发电运行时, 换相刀闸触点 1、2、3 闭合, 机组与系统正常连接; 当抽水工况运行时, 换相刀闸触点 1、4、5 闭合, 机组与系统换相连接。互感器二次回路的正常接线和换相接线都引入保护装置, 发电工况保护通过正常接线交流回路采样, 而抽水工况保护则通过换相接线回路采样。该方法适用于传统机组保护装置, 其二次回路需要进行串并连接, 接线复杂。

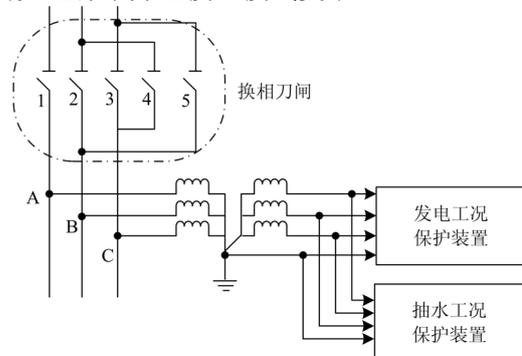


图 2 电压二次回路换相接线示意图

Fig.2 Secondary loop of voltage transformer phase reverse connection

### 3.2 采样通道设置换相

对于有组态配置功能的保护装置，可利用采样通道设置对抽水工况保护进行换相。发电工况保护可与采样通道正常连接，抽水工况保护可与采样通道换相连接，保证进入保护交流量的相序为正序，如图 3 所示。相对二次回路换相，采样通道设置换相的保护二次回路简单，但在保护装置内部仍然对发电工况和抽水工况各配置一套保护，保护装置计算量为常规保护的两倍，对装置的处理、内存等资源要求较高。



图 3 采样通道配置换相示意图

Fig.3 Phase reverse by sample channel configuration

### 3.3 保护相序设置换相

抽水工况运行时，保护装置可根据工况信号改变相序设置，如图 4 所示<sup>[5]</sup>。当保护装置收到抽水工况信号时，保护装置的相序将自动设置为逆时针方向，与抽水工况运行时的实际一次相序一致，保护序分量计算将不会受换相影响。因此，同一套保护装置即能用于发电工况又能用于抽水工况，减少了保护投资。应注意，只有在所有交流采样幅值近似为零，即机组处于停机状态时，相序设置才能被改变，以防止机组运行中因干扰等其他原因导致保护相序设置改变而引起保护误动。

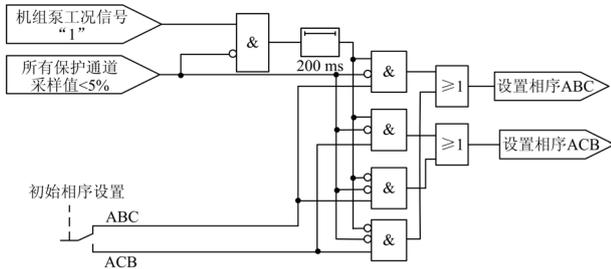


图 4 相序设置逻辑

Fig.4 Phase reverse logic

## 4 差动保护范围与可靠性探讨

抽水蓄能电站的发电机、变压器差动保护通常将电气制动回路、抽水启动回路纳入差动保护范围

内。在抽水启动或电气制动过程中，由于低频电流流向不同的电气分支（如图 5 所示），发电机、变压器差动保护将产生差流。为防止差动保护误动，在抽水启动和电气制动过程中将差动保护闭锁，使其暂时退出运行。如果机组运行中闭锁逻辑出现问题，差动保护将误动或被强制退出运行。因此，差动保护的可靠性在一定程度上依赖于工况信号和保护闭锁逻辑。另外，因蓄能机组工况转换频繁，差动保护经常处于被闭锁状态，不利于机组的安全运行。

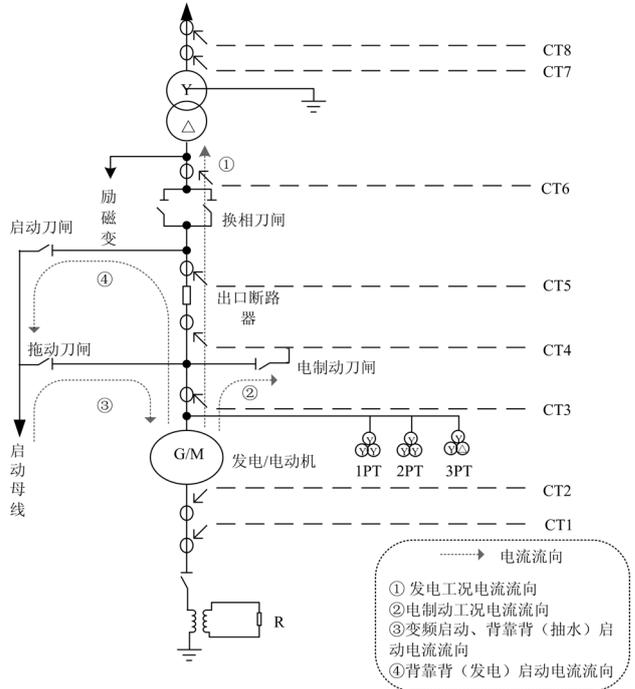


图 5 蓄能机组系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of pumped storage unit

对于将换相刀闸纳入保护范围的差动保护还应考虑抽水运行时的电气换相问题。国内抽水蓄能电站较为常见的做法是，单独配置抽水工况下的差动保护，CT 二次回路与差动保护装置的连接与机组抽水时的一次电气连接一致，差动保护的投退由工况信号控制。也有的蓄能电站抽水、发电工况共用一套差动保护，保护装置利用组态功能在抽水工况下自动改变差动保护与电流采样通道的连接来实现换相。抽水蓄能电站的工况转换较为频繁，后者的可靠性还有待检验，在实际运行中曾出现过在采样通道频繁切换过程中差动保护误动和退出运行的状况。

差动保护作为发电机、主变的主保护其重要性是不言而喻的，为提高抽水蓄能发电组差动保护的可靠性，应合理地选择差动保护范围，尽量减少工

况转换和电气换相对差动保护的影响。在进行发变组差动保护配置时应注意以下问题:

- 1) 考虑到在抽水蓄能电站, 主变为长期运行设备, 选择主变差动保护范围时应尽量减少由于机组工况转换对主变差动保护的影响;
- 2) 主变差动保护范围尽量覆盖机组未并网时主变低压侧 100% 的带电区域, 消除差动保护死区;
- 3) 机组的双重化配置要求;
- 4) 发电机差动保护能够正常工作的频率范围;
- 5) 保护闭锁逻辑的可靠性;
- 6) 所用抽水启动方式的使用频率。

图 5 为典型的蓄能机组一次系统单线图, 如图所示差动保护 CT 选取的位置不同, 其受工况转换的影响也不同。表 1、表 2 分别对常见的发电机和主变差动保护配置、闭锁逻辑进行对比。可以看出, 配置方案 1 的发电机、主变差动保护不受任何机组工况影响, 其可靠性最高, 但差动保护范围较小。蓄能机组一般以变频启动为主, 两台机组之间背靠背启动为辅的启动方式, 因背靠背启动使用较少, 所以配置方案 3 的主变差动保护受机组工况闭锁影响的程度较小, 同时其保护范围也可覆盖机组未并网时主变低压侧 100% 的带电区域。

表 1 蓄能机组发电机差动 CT 配置对比

Tab.1 Comparison between generator differential protections with different CT locations

发电机差动	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
差动 CT 位置 (见图 5)	CT2 CT3	CT2 CT4	CT2 CT5	CT2 CT6
抽水变频启动 (频繁使用)		闭锁	闭锁	闭锁
背靠背启动-拖动 (较少使用)		闭锁	闭锁	闭锁
电气制动 (频繁使用)		闭锁	闭锁	闭锁
背靠背启动-被拖动 (较少使用)				闭锁
电气换相 (频繁使用)				需要
特点	完全不受工况转换影响, 保护范围小		保护闭锁频繁, 受工况转换影响严重	

表 2 蓄能机组主变差动 CT 配置对比

Tab.2 Comparison between main transformer differential protections with different CT locations

主变差动	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
差动 CT 位置 (见图 5)	CT7 CT6	CT7 CT5	CT7 CT4	CT7 CT3
抽水变频启动 (频繁使用)				闭锁
背靠背启动-拖动 (较少使用)				闭锁
电气制动 (频繁使用)				闭锁
背靠背启动-被拖动 (较少使用)		闭锁	闭锁	闭锁
电气换相 (频繁使用)		需要	需要	需要
特点	完全不受工况转换影响, 保护范围小		范围覆盖发电机未并网时主变低压侧 100% 区域 保护闭锁频繁, 受工况转换影响严重	

考虑到差动保护的可靠性和双重化配置原则, 主变和发电机可各配置一套不受工况转换和换相影响的差动保护 (方案 1) 以提高差动保护的可靠性, 差动保护可在任何工况下投入运行; 而作为双重化配置的另一套发电机、主变差动保护, 其保护范围可进行重叠 (方案 3), 以对整个发变组 100% 区域进行保护。

## 5 蓄能机组设计应注意的问题

### 5.1 背靠背启动对注入式定子接地保护的影响

为保护发电机中性点附近的接地故障, 抽水蓄能机组普遍配置注入原理的 100% 定子接地保护。

在机组运行时, 向发电机注入低频交流量, 通过测量低频电压、电流来计算发电机的对地电阻<sup>[6]</sup>。

发电机正常运行时其中性点接地刀闸通常在合闸位置。在背靠背启动过程中, 拖动与被拖动机组通过启动母线相连, 如图 6 所示, 对两台机组连接的整个系统而言就有两个接地点, 100% 定子接地保护将另外机组的中性点接地视为接地故障, 保护出口动作。因此, 在背靠背启动过程中参与启动的两台发电机只能允许一台机组中性点接地运行。背靠背启动后被拖动机组进入抽水工况继续运行, 而拖动机组将进入停机流程。基于上述情况, 背靠背启动过程中被拖动机组的 100% 定子接地保护应投入

运行且其中性点接地刀闸应保持合闸位置，拖动机组的 100%定子接地保护应退出，中性点接地刀闸应处于分闸位置。该问题在背靠背顺控逻辑设计时应给以注意。

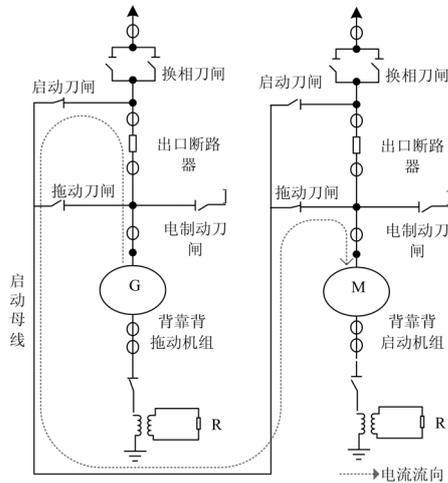


图 6 背靠背启动示意图

Fig.6 Schematic diagram of back to back start-up

### 5.2 工况信号时序与保护配合问题

蓄能机组保护的正常运行在很大程度上依赖于监控系统送出的工况信号。抽水蓄能电站采用的设备不同，造成工况转换顺控逻辑和工况信号送出时序差异很大。例如，有的电站工况信号在工况转换完成之前送出，有的在之后送出，有的电站在工况转换过程中工况信号衔接上存在死区。这些现象在一定程度上影响保护的正常运行。某电站曾出现过因工况信号时序的问题造成保护短时退出和保护误动。通常工况信号为保护、励磁、调速等多个系统共用，在调试后期和机组投运后不能轻易对监控系统的工况信号逻辑进行修改。对因工况信号时序不合理导致出现问题的保护，只能修改保护时间定值，使其尽量与工况信号配合，例如逆功率、低功率等保护。因此，在监控逻辑设计阶段应重视工况信号与保护配合问题。

### 5.3 故障录波装置问题

故障录波器对于机组电气事故分析的重要性是不言而喻的。在蓄能电站，故障录波装置对低频故障数据分析时，如抽水工况启动和电气制动过程中的录波数据，存在序分量、谐波计算误差较大的问题，给电气故障分析造成一定困难。特别是在抽水运行时，故障录波装置将正常运行电流、电压量视为负序分量，导致录波装置频繁启动甚至经常出现死机现象。因此，在对故障录波装置设备选型时应

考虑到抽水蓄能机组的特殊性，以满足蓄能机组的使用要求。

## 6 结束语

抽水蓄能电站一次接线复杂，运行工况多且转换频繁，这对机组保护的配置、性能提出了新的要求。因选用的保护装置不同，在保护配置、二次回路复杂程度、保护闭锁逻辑实现等方面引起的差异很大。在进行抽水蓄能保护设计、配置时应综合考虑，保证机组保护的可靠性。

### 参考文献

- [1] 王维俭, 汤连湘, 鲁华富, 等. 换相操作对抽水蓄能机组保护的影响分析[J]. 继电器, 1995, 23(2): 3-6. WANG Wei-jian, TANG Lian-xiang, LU Hua-fu, et al. Protection system of pumped storage power station affected by phase reverse phaon[J]. Relay, 1995, 23(2): 3-6.
- [2] 马崑, 郑小刚. 逆式抽水蓄能机组背靠背启动过程控制探讨[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009(5): 38-43. MA Wei, ZHENG Xiao-gang. Discuss on back to back startup process of pumped storage unit[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2009(5): 38-43.
- [3] 唐云龙, 魏晓强, 刘志文, 等. 响洪甸抽水蓄能机组及其保护特点的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 86-88, 125. TANG Yun-long, WEI Xiao-qiang, LIU Zhi-wen, et al. Characteristic analysis on protection system at Xiang Hong Dian pumped storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 86-88, 125.
- [4] 蔡鑫贵, 史继莉. 广州蓄能水电厂机组及主变压器继电保护的配置与运行[J]. 继电器, 2006, 34(24): 65-69. CAI Xin-gui, SHI Ji-li. Configuration and operation of Guangzhou pumped storage power station generator and main transformer protection[J]. Relay, 2006, 34(24): 65-69.
- [5] Siemens AG 2002. 发变组 7UM62 保护装置说明书[R]. Siemens AG 2002. Multifunction generator transformer protection relay 7UM62 manual[R].
- [6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996. WANG Wei-jian. The principle and application of main electrical equipment relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

(下转第 92 页 continued on page 92)

由试验结果可见,不论是三相还是相间短路故障,本检测方案均可以在短路电流远未上升到峰值之前做出判断,其检测判断时间仅为 2~4 ms,相比与常规的短路电流检测方案,其检测速度大大提高。

由于试验装置的电流互感器并未采用高饱和倍数的专用互感器,仅采用了常规测量用的普通电流互感器,从实验波形中也可以看到,检测到的互感器二次侧电流出现磁饱和现象。但即便如此,快速检测装置依然能够准确地判断出短路故障,体现出本方案出对检测器件具有良好的适应性。

## 6 结束语

针对常规断路器通过电流幅值判断短路故障、检测速度较慢的问题,本文提出了实时检测电网电压幅值和瞬时有功功率,通过对电压的异常跌落和功率的异常变化进行综合判断来识别短路故障的快速检测方案。

相关仿真研究和试验结果表明,本方案能够快速、有效地检测出电力系统中短路故障,并且对电流互感器的饱和倍数没有特殊要求,具有良好的适用性。

## 参考文献

[1] 刘俊, 马志瀛, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 65-70.  
LIU Jun, MA Zhi-ying, et al. Online real-time calculation of short-circuit current based on improved gradient estimation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (10): 65-70.

[2] 夏天伟, 任继武, 李海波. 智能脱扣器的研究[J]. 电工技术杂志, 2001, (4): 23-25.  
XIA Tian-wei, REN Ji-wu, LI Hai-bo. The research of intelligent release[J]. Electrotechnical Journal, 2001, (4): 23-25.

[3] 张吉, 林鹤云. 基于 DSP 的智能化断路器及其主算法的实现[J]. 电气传动, 2004, 23 (7): 69-71.  
ZHANG Ji, LIN He-yun. Intelligent circuit breaker based

on DSP and the realization of the main algorithm[J]. Electrical Transmission, 2004, 23 (7): 69-71.

[4] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 14 (1): 24-27.  
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Power quality disturbance identification using dq conversion-based neural classifier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 14 (1): 24-27.

[5] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无延时的改进 d-q 变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 23 (7): 69-71.  
ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of improved d-q transform without time delay in dynamic disturbance identification[J]. Power System Technology, 2004, 23 (7): 69-71.

[6] Akagi N A, et al. Instantaneous reactive power components comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on IA, 1984, 20 (3): 625-630.

[7] 刘进军, 王兆安. 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义[J]. 电工技术学报, 1998, 13 (6): 6-11.  
LIU Jin-jun, WANG Zhao-an. Uniform mathematical description of instantaneous reactive power theory and conventional power theory and its physical meaning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13 (6): 6-11.

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-05-20

### 作者简介:

吴浩伟 (1981-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电能检测与变换技术; E-mail: cos\_wu@163.com

周 樑 (1980-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统监控与测量;

孙朝晖 (1978-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中运用。

(上接第 70 页 continued from page 70)

收稿日期: 2009-12-31; 修回日期: 2010-01-25

### 作者简介:

王 昕 (1977-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电网事故分析, 电网、发电厂继电保护现场调试工作;

E-mail: Wangxin\_brave@yahoo.com.cn

井雨刚 (1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电网事故分析, 电网、发电厂继电保护现场调试工作;

王大鹏 (1970-), 女, 教授, 硕士研究生, 主要从事继电保护及自动化研究工作。