

DOI: 10.7667/PSPC180282

并联电容器组谐波微机保护装置的研究与设计

陈晓宇¹, 蔡重凯¹, 耿介雯², 张帆³, 王昕², 俞永军¹, 王新华²

(1. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 深圳市中电电力技术股份有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 随着非线性用电设备的大量增加, 电网谐波问题日益严重。并联电容器由于其本身的阻抗呈容性, 更容易受到谐波的影响。此外, 现有电容器的保护没有考虑到谐波带来的影响, 导致在谐波环境下, 电容器保护无法有效对电容器的安全运行进行保护。分析了谐波对现有电容器组保护的影响, 在现有电容器保护的基础上设计了电容器谐波保护的方法及其整定原则。基于 OMAP-L138 处理器设计了一种新的并联电容器组谐波微机保护装置, 除电容器组常规保护之外, 实现了对并联电容器组单次谐波保护以及总谐波畸变率保护。最后通过实验室的测试验证了装置的精度及保护动作误差满足实际的运行要求。

关键词: 并联电容器; 继电保护; 谐波保护; 微机保护; 双核处理器

Research and design of microcomputer-based harmonic protection equipment for shunt capacitor

CHEN Xiaoyu¹, CAI Zhongkai¹, GENG Jiewen², ZHANG Fan³, WANG Xin², YU Yongjun¹, WANG Xinhua²

(1. Shaoxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd, Shaoxing 312000, China; 2. CET Shenzhen Electric Technology Inc., Shenzhen 518000, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the increasing usage of non-linear devices, harmonic problem has become more and more serious in power grid. The shunt capacitor is very susceptible to harmonics because of its capacitive resistance. But existing capacitor protectors don't take into account the influence of harmonics, resulting that shunt capacitor cannot be effectively protected under the harmonic surroundings. This paper analyzes the harm of harmonics to capacitors, puts forward new harmonic protection methods and setting rules, and designs a microprocessor-based harmonic protection equipment based on OMAP-L138 processor which can realize single harmonic protection and total harmonic distortion rate protection besides common protections for shunt capacitor. Finally, the accuracy and error of the harmonic protection equipment is verified by laboratory test.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211SX16000H).

Key words: shunt capacitor; relay protection; harmonics protection; microcomputer protection; dual-core processor

0 引言

随着电网的发展和变电站智能化程度的提高, 对电容器组频繁投切操作的需求日益提高; 另一方面, 随着用户变频电机、电气化铁路等非线性用电设备的大量增加, 电网电能质量, 尤其是谐波环境日益恶化^[1-5], 传统的并联电容器组运行环境日益严酷, 故障频发, 已严重影响到自身和相连电网设备的运行安全^[6-8]。国标《GB 50227-2017 并联电容器装置设计规范》^[9]规定了并联电容器组投入运行之

后所需投入的保护, 包括过电流保护、过电压保护、失压保护、不平衡保护等。随着电网智能化以及保护装置的发展, 微机保护已成为目前主流的继电保护方式^[10-11]。而微机保护多数是以基波电压电流有效值作为保护动作的判断依据, 没有考虑谐波对电容器保护的影响^[12-14], 在谐波严重的情况下, 基波电压或电流有效值无法反映实际电压电流信号的真实有效值, 导致相关的电容器保护不能及时动作, 使电容器长期运行在恶劣的谐波环境下。

针对上述问题以及实际应用场景, 本文研究了并联电容器组的综合谐波保护装置, 在常规电容器保护功能的基础上, 增加了谐波保护的功能, 当电

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5211SX16000H)

容器回路的谐波相关指标超过整定值时, 及时告警并切除电容器, 避免电容器组过载发生故障。

1 谐波对电容器保护的影响

1.1 电网谐波问题分析

由于各类非线性负荷以及电力电子元件的出现, 电网中谐波问题日益突出。电网中的谐波问题主要体现在谐波电流上。某市级电网建设了规模为 552 个监测点的电能质量监测系统, 在某次谐波情况分析中, 有 65 个监测点谐波电流超标, 其中, 5 次谐波电流超标的监测点多达 41 个, 7 次谐波电流超标的监测点为 19 个。某 110 kV 变电站的 10 kV 监测点谐波电流如表 1 所示, 从表 1 中可以看出, 该变电站的 5 次谐波电流及 7 次谐波电流均出现超标情况, 其中, 5 次谐波电流超标严重。

表 1 某监测点谐波电流统计

Table 1 Harmonic current statistics of a monitoring point

指标	A 相		B 相		C 相		国标/ A
	最大 值/A	平均 值/A	最大 值/A	平均 值/A	最大 值/A	平均 值/A	
基波	763.15	559.2	758.3	560.4	759.1	560.03	—
2	7.1	0.87	6.8	0.86	4.65	0.81	26
3	6.2	1.59	7.4	1.63	8.95	1.74	20
5	70	24.5	64.96	24.37	56.35	24.65	20
7	21.3	8.03	18.42	7.41	16.95	7.01	15
11	7.55	2.44	7.45	2.37	7.75	2.01	9.3
13	4.55	1.39	4.36	1.13	4.15	1.21	7.9

1.2 谐波对过电流保护的影响

谐波对过电流保护的影响主要体现在电容器组电容与电感形成对特定次数谐波的谐波电流放大的情况上^[15-16]。若采用按基波电流整定的微型继电器保护装置, 当谐波电流被放大时, 基波电流有效值将无法正确反映电流总有效值, 过电流保护无法及时动作, 无法保证电容器组的安全运行。

1.3 谐波对过电压保护的影响

系统中的谐波电流流入电容器之后将产生谐波电压。假设电容器支路承受的第 h 次谐波电压为 U_h , 则电容器支路的总电压有效值为

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{U_1^2 + \sum U_h^2} = U_1 \sqrt{1 + \text{THD}_U^2} \quad (1)$$

式中: U_1 为母线基波电压; THD_U 为总谐波电压畸变率。

则过电压倍数为

$$n = \frac{U_{\text{rms}}}{U_N} = \frac{U_1}{U_N} \sqrt{1 + \text{THD}_U^2} \quad (2)$$

式中, U_N 为电容器额定电压归算至母线处的电压。

从式(2)中可知, 过电压倍数与谐波电压畸变率正相关。当基波电压在正常范围之内时, 需要较大的谐波电压畸变率才会使得过电压倍数达到国标规定的 1.1 倍的整定值, 也即目前的过电压保护只有在谐波电压畸变非常严重的情况下才会动作, 不能很好地保护并联电容器组的安全运行。

1.4 谐波对不平衡保护的影响

根据并联电容器组接线方式的差别, 不平衡保护分为不平衡电压保护(包括开口三角电压保护和电压差动保护)和不平衡电流保护(包括桥差电流保护和中性点不平衡电流保护)^[17-19]。但无论是不平衡电压保护还是不平衡电流保护, 谐波对其的影响类似于对过电流保护和过电压保护的影响, 也即当谐波含量较大时, 若采用基波电压或电流有效值作为保护的整定依据, 则无法正确反映实际的电压或电流有效值, 使保护无法及时动作。

基于以上谐波对并联电容器组危害的分析, 有必要在电容器组上加装谐波保护装置, 设计合理的电容器组的谐波保护方案, 以保障电容器组的安全可靠运行。

2 并联电容器保护功能的设计及整定

基于对谐波对电容器组保护产生的影响分析可知, 目前的电容器保护在电网谐波的影响下, 可能会发生拒动的情况, 无法保证电容器的安全运行。为提高对并联电容器组运行及其保护的可靠性, 本文提出了并联电容器组的谐波保护方法, 在现有电容器保护功能的基础上, 增加了针对谐波的保护, 保证电容器组的安全稳定运行。

2.1 过电流保护

过电流保护用于防止电容器在过电流运行的情况下导致电容器组过热。当电容器三相电流中任意一相电流有效值超过整定值时, 保护将经延时后切除电容器。为避免基波电流有效值无法反映总电压有效值的问题, 采用电容器支路的总电流有效值进行判断, 也即

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_{C1}^2 + \sum I_{Ch}^2} \quad (3)$$

式中: I_{C1} 为电容器支路基波电流; I_{Ch} 为电容器支路谐波电流。

过电流保护的判断依据为

$$I_{\text{rms}} \geq I_{\text{set}} \quad (4)$$

式中: I_{rms} 为电容器任意一相电流的有效值; I_{set} 为过电流保护整定值。

整定原则: 根据国标规定, 电容器的电流不能超过额定电流的 1.3 倍, 当 I_{set} 达到 1.3 倍额定电流

时, 保护经延时跳闸。

2.2 过压保护

过电压保护用于防止电容器在过电压运行的情况下发生绝缘损坏。当电容器三相电压中任意一相电压的有效值超过整定值时, 保护将经延时后切除电容器。

过电压保护的判断依据为

$$U_{\text{rms}} \geq U_{\text{set}} \quad (5)$$

式中: U_{rms} 为电容器任意一相电压的有效值; U_{set} 为过电压保护的整定值。

整定原则: 为确保安全, 过电压整定值的选取较为保守, 当 U_{set} 达到 1.1 倍额定电压时, 保护动作于信号, 当 U_{set} 达到 1.2 倍额定电压时, 保护经延时跳闸。

2.3 不平衡保护

不平衡保护用于对电容器组内部故障进行反馈及保护。根据电容器组的接线方式不同, 分别配置了不同的不平衡保护。

整定原则: 不平衡保护的整定值根据不同保护方式进行取值。当采用外熔断器保护时, 不平衡保护按单台电容器过电压允许值整定; 当作为单台电容器内部故障时, 按单台电容器内部元件故障率进行保护整定计算; 采用内熔丝保护和无熔丝保护时, 按电容器内部元件过电压允许值整定。

2.4 失压保护

失压保护用于防止所连接的母线失压后恢复送电而使电容器带电荷合闸而产生的危害。当母线电压降低到一定程度之后, 保护经延时后将电容器切除。

失压保护的判断依据为

$$U_{\text{rms}} \leq U_{\text{set}} \quad (6)$$

整定原则: 失压保护的整定值既要保证在电容器失压后的可靠动作, 又要避免母线发生电压暂态事件的误动。因此, U_{set} 可整定为 50%~60% 的电网标称电压, 并经短时延时跳闸。

2.5 单次谐波保护

由上文分析, 电容器组会对特定次数的谐波产生放大作用, 进而影响电容器的常规保护功能。通常, 电容器组在投入运行之后, 还会安装有电抗器, 电抗率根据并联电容器接入电网处的背景谐波含量的测量值进行选择。当谐波为 5 次及以上时, 电抗率取 4.5%~5.0%; 当谐波为 3 次及以上时, 电抗率取 12%, 或者采用 4.5%~5.0% 与 12% 两种电抗率混合的方式; 若电网中谐波电压较小, 电抗率取 0.5%。当电容器发生谐振时, 谐波次数的计算为

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_S}} = \sqrt{\frac{SCC}{Q_C}} \quad (7)$$

式中: Q_C 为电容器的额定容量, 单位为 Mvar; SCC 为母线的短路容量, 单位为 MVA。

为了防止谐振对电容器及电容器保护造成影响及危害, 本文根据电容器的额定容量及接入母线的短路容量来对合适的单次谐波保护进行整定。基于式(7), 针对可能发生电压或电流谐振的谐波次数, 投入相应的单次谐波保护, 防止因谐波振荡而导致电容器组的损坏, 进而危及电网的安全运行。

整定原则: 根据式(7)确定对电容器及其保护影响较大的谐波次数后, 根据国标限值^[20]进行整定。当单次谐波超过整定值之后, 保护动作, 经延时后跳闸。

2.6 总谐波畸变率保护

由于现有的过电压保护无法有效保护并联电容器免受谐波电压畸变的影响, 因此有必要设计谐波电压畸变率保护, 当总谐波电压畸变率超过一定限值时, 保护装置将动作, 避免电容器组长时间运行于谐波环境中。

整定原则: 按照文献[20]中的规定对畸变率值进行整定。

3 综合谐波保护装置的设计

3.1 谐波保护装置硬件架构设计

3.1.1 开发平台的选择

目前常用的开发平台分为分时操作系统和实时操作系统。分时操作系统按照相等的时间片调度进程轮流运行, 由调试程序自动计算进程的优先级, 主要用于科学计算和实时性要求不高的场合。实时操作系统具备更强的实时性能, 更加适用于过程控制、数据采集、通信等对时间敏感的场合。经研究, 本文采用高实时性的 VxWorks^[21-22] 作为综合谐波保护装置的开发平台, 以保证对谐波分析的可靠性及实时性的要求。

3.1.2 硬件总体架构

常规电容器保护不涉及到对谐波的分析及处理, 因此对保护装置性能要求不高, 而本文设计的谐波保护装置需要对谐波进行处理, 运算量大, 除了需要完成对电压电流信号的处理、分析之外, 还需要实现对外部的通信、数据的存储与管理以及人机交互等功能, 因此, 对处理器的性能要求较高。通过对谐波保护装置需要实现功能的分类以及处理器性能的考虑, 采用双核 OMAP-L138 作为装置的主处理器。该处理器可通过人为约束确定每个内核所控制的外部设备。整个硬件总体架构如图 1 所示。从图 1 中可知, OMLAP-L138 处理器的两个核心分别控制不同的外部设备。

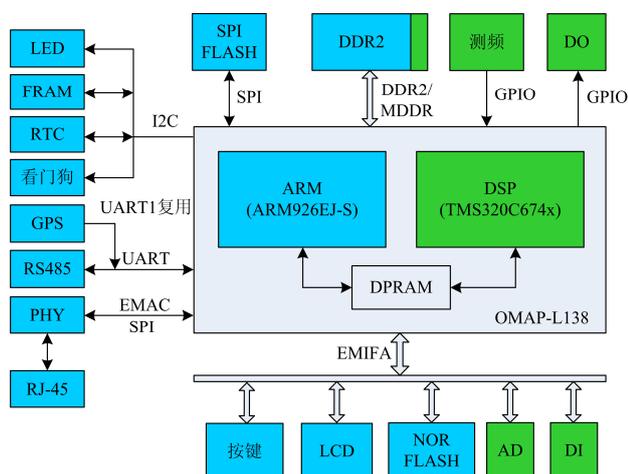


图1 谐波保护装置硬件总体架构

Fig. 1 Hardware framework of harmonics protection equipment

1) 处理器功能设计

OMAP-L138 处理器为双核架构, 分为 ARM 核心和 DSP 核心。其中, ARM 核心型号为 ARM926EJ-S, 适用于事务处理等功能; DSP 核心型号为 C674x, 是一款定点和浮点兼容的 DSP 核心, 可以在单周期完成浮点运算, 这在傅里叶变换、谐波分析计算中能发挥巨大优势^[23-25]。结合 OMAP-L138 处理器双核心的特点, 以及谐波保护需要实现的功能, 高事务处理能力的 ARM 核心用于实现人机交互、通信功能、数据存储与管理等功能; 高计算性能的 DSP 用于实现模拟量/开关量采集、出口控制以及保护、测量算法等功能。图1中体现了 ARM 核心及 DSP 核心所控制的硬件设备。

2) 外部存储器设计

存储器是谐波保护装置的记忆设备, 用于存放程序及数据。OMAP-L138 芯片自带双核共享内存 DPRAM, 用于双核之间的数据交换, 但无法满足谐波保护装置的全部程序及数据的存储。因此, 需要进行存储器扩展, 以满足程序高速运算及存储的需求。谐波保护装置外扩的存储设备包括 DDR2、FRAM、SIP FLASH 以及 NOR FLASH。基于不同存储设备的特性, 对各存储设备的存储功能进行了区分。其中, DDR2 主要由 VxWorks 操作系统管理, 为整个系统的主内存; FRAM 用于存储定值数据; SPI FLASH 为片外低速串行 FLASH 的存储设备, 用于故障录波、波形记录、事件记录的存储; NOR FLASH 为内核镜像。

3) 通信方案设计

综合谐波保护装置设计了多种通信口, 可以通过多种方式接入各电力监控网络中, 实现遥测、遥

信、遥控以及事件记录、故障记录、装置自检信息和故障录波数据传输等功能。装置内置了 IEC61850、Modbus-RTU、Modbus-TCP、IEC60870-103 等多种通信规约, 可以应用于传统变电站以及数字化变电站^[26]。

3.2 谐波保护流程的设计

谐波保护装置的保护主任务流程设计如下:

- (1) 首先检查保护动作的复归信号的置位情况, 若未复归, 则先复归相关信号;
- (2) DSP 对采集到的电压电流信号进行 FFT 变换, 得到各次谐波电压/电流值;
- (3) 判断投入的保护是否到达保护闭锁时间, 若未到达闭锁时间, 则进入保护主逻辑, 判断投入的保护是否超过整定值;
- (4) 对保护状态位进行更新, 并写入保护相关的 SOE 事件。

具体流程图如图2所示。

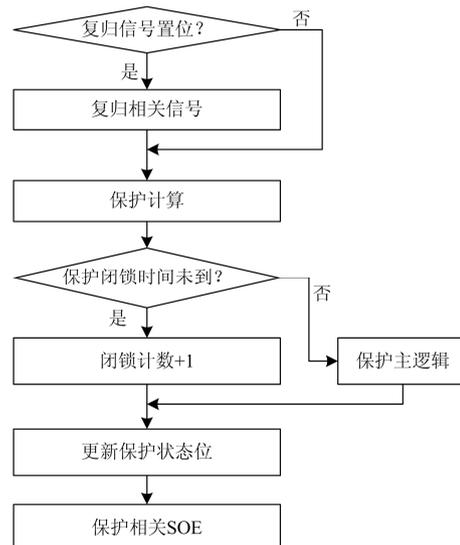


图2 保护功能主流程图

Fig. 2 Flowchart of protection function

4 谐波保护的测试结果

4.1 保护行为分析及测试

1.1 节中的变电站 10 kV 侧配有无功补偿电容器组, 采用单星形不接地的接线方式, 每相电容器组串有 1% 的电抗器。根据变电站参数以及电容器参数, 得知该变电站等值电抗 X_S 为 0.267Ω , 电容器基波容抗为 8.067Ω 。流入电容器的第 h 次谐波电流可用式(8)来表达。

$$I_{Ch} = \frac{h \cdot X_S}{h \cdot X_S + h \cdot X_L - \frac{1}{h} \cdot X_C} \cdot I_h \quad (8)$$

式中: I_{Ch} 为流入电容器的第 h 次谐波电流; X_S 为

系统的基波短路电抗； X_L 为电抗器基波感抗； X_C 为电容器基波容抗； h 为谐波次数。

则谐波放大倍数 K 为

$$K = \frac{s \cdot h^2}{s \cdot h^2 + k \cdot h^2 - 1} \quad (9)$$

式中： s 为系统电抗率， $s = X_S/X_C$ ； k 为电抗器的电抗率， $k = X_L/X_C$ 。

根据式(8)和式(9)可得出在串抗率为 1% 时各次谐波电流的放大倍数如表 2 所示。

表 2 电容器各次谐波电流放大倍数

谐波次数 h	3	5	7	9	11	13
放大倍数 K	-0.49	10.68	1.46	1.08	0.95	0.89

由表 2 可知，该变电站对 5 次谐波放大情况严重。电容器过电流倍数为

$$m = \frac{\sqrt{I_{C1}^2 + \sum I_{Ch}^2}}{I_{CN}} = \frac{I_{C1}}{I_{CN}} \sqrt{1 + \sum (K_h \cdot H_h)^2} \quad (10)$$

式中： I_{C1} 为流入电容器的基波电流； I_{Ch} 为流入电容器的第 h 次谐波电流； K_h 为第 h 次谐波电流的放大倍数； H_h 为第 h 次谐波电流的含有率； I_{CN} 为电容器的额定电流。

当过电流倍数超过 1.3 时，过电流保护应当动作，当 5 次谐波电流含量超过 7.78% 时，过电流倍数将可能超过 1.3，若采用按电流基波整定的微机继电保护装置时，过电流保护将会拒动。而从表 1 中对该变电站谐波电流的统计分析可知，其 5 次谐波电流最大值达到了 9.17%，将可能使电容器运行在过电流的环境中，影响电容器的使用寿命，对其安全运行带来隐患。而若投入谐波保护装置，基于现场的实际谐波环境，对该电容器投入 5 次谐波保护，则可避免此情况的发生。

相应地，本文在实验室环境下，测试加 5 次谐波电流分别对本文提出的谐波保护装置以及常规保护装置进行动作行为测试。本谐波保护装置 5 次谐波整定值设为 0.5 A，实验室控制标准源输出基波电流为 5 A，并逐渐加大 5 次谐波电流含量至整定值，谐波保护装置动作，而作为对比试验的常规电容器保护装置为按电流基波整定的微机继电保护装置，在基波电流小于其整定值时，保护不会动作。

通过理论分析以及实验室测试可知，若电容器运行环境中谐波含量较高时，电流有效值有可能超过过流保护的整定值，按电流基波整定的微机继电保护可能会出现拒动的情况，而本文提出的谐波保护装置在投入谐波电流保护的情况下，可有效避

免此情况发生。

4.2 保护动作精度测试

在实验室对谐波保护装置的谐波测量值及各谐波保护功能进行测试，测试内容包括谐波测量检验、有效值过压/过流保护、单次谐波保护、谐波电压畸变率保护。测试结果如下所述。

(1) 谐波测量检测：当 $U_h \geq 1\%U_n$ 时， U_h 的相对误差小于 $\pm 1\%$ ，当 $U_h < 1\%U_n$ 时， U_h 的相对误差小于 $\pm 0.05\%$ ；当 $I_h \geq 1\%I_n$ 时， I_h 的相对误差小于 $\pm 1\%$ ，当 $I_h < 1\%I_n$ 时， I_h 的相对误差小于 $\pm 0.1\%$ ，达到了国标 GB/T14543-93《电能质量公用电网谐波》规定的 A 级装置的测量精度要求；

(2) 有效值过压/过流保护：有效值过压保护动作值误差小于 $\pm 2.5\%$ 或 ± 0.2 V，有效值过流保护动作值误差小于 $\pm 2.5\%$ 或 ± 0.01 A；

(3) 单次谐波保护：谐波电压保护动作值误差小于 $\pm 2.5\%$ 或 ± 0.25 V，谐波电流保护动作值误差小于 $\pm 2.5\%$ 或 ± 0.05 A；

(4) 谐波电压畸变率保护：误差小于整定值的 $\pm 2.5\%$ 。

5 结论

为解决现有电容器保护的不足、保障电容器组安全可靠运行，本文介绍了一种电容器组的谐波微机保护装置。装置的开发平台采用高实时性的 VxWorks 操作系统，硬件部分采用双核 OMAP-L138 作为 CPU，可以通过人为约束其控制的外部设备。通过软件的设计，在现有电容器保护的基础上，实现对电容器组单次谐波保护和谐波畸变率保护，有效地避免了各种谐波问题对电容器组造成的危害，保障电网运行的安全。通过实验室的测试，验证了谐波保护装置与常规电容器保护装置的的动作行为，同时验证了谐波保护装置的测量精度以及动作误差满足实际的运行要求。此外，该综合谐波保护装置设计了不同的通信口，在传统变电站以及数字化变电站均可得到应用。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [2] 曾江, 凌毓畅. 光伏电站接入电网的电能质量分析及

- 其应用[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 38-46.
- ZENG Jiang, LING Yuchang. Analysis and application of power quality of grid-connected photovoltaic power station[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 38-46.
- [3] 涂春鸣, 杨义, 肖凡, 等. 非线性负载下微电网主逆变器输出侧电能质量控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2486-2495.
- TU Chunming, YANG Yi, XIAO Fan, et al. The output side power quality control strategy for microgrid main inverter under nonlinear load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2486-2495.
- [4] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等. 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 33-41.
- ZHU Xiaojuan, HU Haitao, TAO Haidong, et al. The Mechanism and influence of harmonic instability for photovoltaic grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 33-41.
- [5] 唐宏伟, 唐杰, 林立. 新型电气化铁路电能质量管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 84-91.
- TANG Hongwei, TANG Jie, LIN Li. New power quality management system in electrical railway[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 84-91.
- [6] 王莉虹, 肖先勇, 张逸, 等. 非线性负荷谐波贡献畸变功率评估指标与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 41-47.
- WANG Lihong, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. A distortion power based assessment index and method of harmonic contribution of nonlinear loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 41-47.
- [7] 殷明. 电网谐波对电容器的影响[J]. 电子技术与软件工程, 2017(16): 226.
- YIN Ming. The influence of harmonics to capacitor[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(16): 226.
- [8] 查志鹏, 康文斌, 张波, 等. 电力电容器噪声谐波影响特性试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 172-178.
- ZHA Zhipeng, KANG Wenbin, ZHANG Bo, et al. Experimental study on the impact of noise harmonics on power capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 172-178.
- [9] 中国电力企业事业联合会. 并联电容器装置设计规范: GB 50227—2017[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- China Electricity Council. Code for design of installation of shunt capacitors: GB 50227—2017[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.
- [10] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96.
- ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.
- [11] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [12] 薛海芹. 电力电容器保护装置研发及实验研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- XUE Haiqin. Research and experiment of power capacitor protection equipment[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [13] 刘小婷. 基于微机的电容器保护装置[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- LIU Xiaoting. The device of capacitor protection based on microprocessor[D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [14] 王贺萍, 田二胜, 王露. 基于多分组并补电容器的新型微机保护装置研制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 131-134.
- WANG Heping, TIAN Ersheng, WANG Lu. Development of microcomputer protection based on multi-group parallel capacitors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 131-134.
- [15] 郑伟. 变压器直流偏磁下电容器谐波保护的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- ZHENG Wei. Research on capacitor protection for the harmonics caused by the DC bias of power transformers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [16] 岑旭. 谐波对电力电容器寿命及保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- CEN Xu. Research of the influence of harmonic on the life and protection of power capacitor bank[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 肖遥, 张晋寅, 黎建平, 等. H型接线高压滤波电容器组不平衡电流保护判据及定值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 120-128.
- XIAO Yao, ZHANG Jinyin, LI Jianping, et al. Criterion and settings of unbalanced current protection for filter

- capacitor bank of H configuration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 120-128.
- [18] 肖遥, 张晋寅, 杨晓峰, 等. II型接线滤波电容器组不平衡电流保护判据及定值[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 137-144.
XIAO Yao, ZHANG Jinyin, YANG Xiaofeng, et al. Criteria and settings of unbalanced current protection for filter capacitor bank of II configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 137-144.
- [19] 肖遥, 夏谷林, 张楠. H和II接线高压滤波电容器组不平衡电流保护的定值计算及比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1): 239-245.
XIAO Yao, XIA Gulin, ZHANG Nan. Settings calculation and comparison of unbalanced current protection of high voltage filter capacitor banks connected as H and II circuits[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 239-245.
- [20] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 国家技术监督局, 1993.
National Technical Committee on Voltages, Current Ratings and Frequencies of Standardization Administration of China. Quality of electric energy - supply harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: State Bureau of Technical Supervision of China, 1993.
- [21] 董艳铃, 常扬. Vxworks 嵌入式实时操作系统任务调度方法研究[J]. 计算机与网络, 2014, 40(10): 55-58.
DONG Yanling, CHANG Yang. Research on task scheduling algorithm in VxWorks embedded real-time operating system[J]. Computer & Network, 2014, 40(10): 55-58.
- [22] 刘益青, 高伟聪, 房同忠, 等. VxWorks 在电力系统测控保护装置中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 149-152.
LIU Yiqing, GAO Weicong, FANG Tongzhong, et al. Application of VxWorks in measuring-control and protection devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 149-152.
- [23] Texas Instruments. OMAP-L138 C6000 DSP+ARM processor (Rev.D)[EB/OL]. [2014]. <http://www.ti.com/lit/er/sprz301m/sprz301m.pdf>.
- [24] Texas Instruments. OMAP-L138 C6000 DSP+ARM processor technical reference manual (Rev.C)[EB/OL]. [2016]. <http://www.ti.com/lit/ug/spruh77c/spruh77c.pdf>.
- [25] Texas Instruments. TMS320C6748™ fixed-and floating-point DSP[EB/OL]. [2017]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c6748.pdf>.
- [26] 刘世丹, 袁亮荣, 曾耿晖, 等. 一种基于 IEC 61850 统一建模的多智能变电站数据共享方案[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 109-112.
LIU Shidan, YUAN Liangrong, ZENG Genghui, et al. Unified modeling data sharing plan for multi-interlligeng substations based on IEC 61850[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 109-112.

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-07-02

作者简介:

陈晓宇(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为无功补偿与电能质量; E-mail: shiyanzhan@qq.com

蔡重凯(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为无功补偿与电能质量; E-mail: cakoky@foxmail.com

耿介雯(1990—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电能质量监测。E-mail: gengjiewen@cet-electric.com

(编辑 姜新丽)