

电能质量控制技术综述

朱桂萍, 王树民

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 电能质量包括电压质量、频率质量和供电可靠性 3 个方面, 其中又以电压质量问题最为普遍。文中首先介绍了目前采用较为广泛的几种电能质量评价指标; 其次介绍了包括 PID 控制、自适应控制及智能控制等电能质量分析与控制方法。最后指出了电能质量控制技术的发展趋势。

关键词: 电能质量; PID 控制; 矢量控制; 无差拍控制; 自适应控制; 模糊控制; 用户电力技术

中图分类号: TM92; TM761

0 引言

电能质量问题的提出由来已久, 在电力系统发展的早期, 电力负荷的组成比较简单, 主要由同步电动机、异步电动机和各种照明设备等线性负荷组成, 因此衡量电能质量的指标也比较简单, 主要有频率偏移和电压偏移两种。20 世纪 80 年代以来, 随着电力电子技术的发展, 非线性电力电子器件和装置在现代工业中得到了广泛应用, 同时, 为了解决电力系统自身发展存在的问题, 直流输电和 FACTS 技术不断投入实际工程应用, 调速电机以及无功功率补偿电容器也大量投入运营。这些设备的运行使得电网中电压和电流波形畸变越来越严重, 谐波水平不断上升。另外, 冲击性、波动性负荷, 例如电弧炉、大型轧钢机、电力机车等, 运行中不仅会产生大量的高次谐波, 而且还会产生电压波动、闪变、三相不平衡等电能质量问题。但另一方面, 随着各种复杂的、精密的、对电能质量敏感的用电设备不断普及, 人们对电能质量的要求越来越高, 因而电能质量成为目前研究的热点。

本文从电能质量的定义、分析与控制方法以及装置等方面介绍了电能质量控制技术的研究与发展现状, 并提出了电能质量控制技术的发展趋势。

收稿日期: 2002-01-29; 修回日期: 2002-08-23。

[编者按] 随着计算机技术的日益普及, 大量基于计算机系统的控制设备和电子装置对供电质量异常敏感, 对电能质量的要求也不断提高; 同时, 基于电力电子技术的装置和设备、电气化铁路以及家用电器等非线性、冲击性负荷的不断增多, 对电能质量造成了严重的污染。因此, 改善电能质量对于电网和电气设备的安全、经济运行具有重要的意义。本刊将把“电能质量监测和控制”作为重要选题方向, 本期“电能质量控制技术专题”旨在引起各方面对此问题的兴趣和关注。真诚欢迎大家各抒己见, 踊跃投稿。

1 电能质量评价指标

目前, 世界各国对电能质量的定义都不完全相同。概括起来, 电能质量主要包括电压质量、频率质量和供电可靠性 3 个方面。对频率质量的要求全网相同, 不因用户而改变, 本文不做详细介绍。决定电压质量的指标很多, IEEE 第 22 标准协调委员会和其他国际委员会最新采用 11 种专用术语来说明电压质量的主要扰动^[1,2]:

a. 电压中断(断电, interruption, outage): 在一定时间内, 一相或多相完全失去电压(低于 0.8(标幺值))称为断电。按持续时间长短, 分为瞬时断电(0.5 周期~3 s)、暂时断电(3 s~60 s)和持续断电(大于 60 s)。

b. 频率偏差(frequency deviation): 各国对此均已做出明确规定。

c. 电压下跌(sag)(电压跌落, dip): 持续时间为 0.5 周期~1 min, 幅值为 0.1~0.9(标幺值), 系统频率仍为标称值。

d. 电压上升(电压隆起, swell): 电压(或电流)持续时间为 0.5 周期~1 min, 幅值为 1.1~1.8(标幺值), 系统频率仍为标称值。

e. 瞬时脉冲(impulse): 在两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的电压(或电流)变化。瞬时脉冲可以是任一极性的单方向脉冲, 也可以是发生在任一极性的阻尼振荡波第 1 个尖峰。

f. 电压波动(fluctuation)与闪变(flicker): 电压波动是在包络线内的电压的有规则变动, 或是幅值通常不超出 0.9~1.1 电压范围的一系列电压随机变化。闪变则是指电压波动对照明灯的视觉影响。

g. 电压切痕(notch): 电压切痕是一种持续时间小于 0.5 周期的周期性电压扰动。电压切痕主要由于电力电子装置在相关的两相间发生瞬时短路时电流从一相转换到另一相而产生的。电压切痕的频率非常高, 用常规的谐波分析设备很难检测出来, 这

就是过去从未有过此项电压扰动内容,直到最近才正式列入的原因。

h. 谐波(harmonics):含有基波整数倍频率的正弦电压或电流称为谐波。谐波是由于电力系统和电力负荷设备的非线性特性造成的。

i. 间谐波(inter-harmonics):含有基波非整数倍频率的正弦电压或电流称为间谐波。小于基波频率的分数次谐波也属于这一类。间谐波会使照明装置引发视觉闪变。

j. 过电压(overvoltage):电压(或电流)持续时间为大于1 min,幅值为1.1~1.2(标么值),系统频率仍为标称值。

k. 欠电压(undervoltage):电压(或电流)持续时间为大于1 min,幅值为0.8~0.9(标么值),系统频率仍为标称值。

电能质量问题归纳起来主要包括以下4个方面:①电压波动(fluctuation)和闪变(flicker);②谐波(harmonics);③电压三相不平衡(unbalance);④电压降低(dip)和供电中断(outage)。

2 电能质量分析与控制方法

改善电能质量的装置和措施很多,以大功率电力电子器件为核心单元的新型装置可以用来有效地抑制或抵消电力系统中出现的各种短时、瞬时扰动,而常规措施则很好地适用于稳态电压调整。电能质量控制装置按功能可分为以下三大类:无功补偿装置、滤波器和着重于解决暂态电能质量问题的统一电能质量调节器(UPQC)。要想使电能质量控制装置充分发挥其设计功能,采用准确、高效的分析与控制方法是至关重要的。首先要获得及时、准确的有关“源”信息,如三相电压、三相电流、中线电流及中线对地电压等,然后对这些源信息进行实时、快速的分析,得到所需的控制信息,控制装置根据这些控制信息,采用适当的控制方法产生相应的动作,最终才能得到理想的补偿效果。

2.1 扰动信号的提取

对于电压波动和闪变、谐波、三相不平衡这些变化相对较缓慢、持续时间较长的电能质量问题,对称分量法、谐波分析法是最常用的时域分析方法。它们的特点是数学表达式简单,物理概念明确。但时域分析方法计算量大、耗时长,不能实现实时、在线控制,因此必须采用变换的方法,快速、准确地得到所需的控制信号。傅里叶变换作为最经典的信号处理手段在电能质量检测中发挥了重要作用。目前,各种算法的离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)已经成为频谱分析和谐波分析的基础^[3]。

对于电压下跌、电压上升、瞬时脉冲以及电压瞬时中断等这类电能质量扰动,由于它持续时间短,发

生时间具有很大的随机性,傅里叶变换已不能满足要求,因此必须采用新的信号分析方法,如加窗傅里叶变换^[4]、短时傅里叶变换和小波变换^[5,6]等。另外,将传统的分析方法与新兴的智能方法相结合也是分析电能质量问题的一个趋势^[7]。

谐波电流的检测与分析是电能质量分析的另一一个重要方面。现有的谐波电流检测方法有基于Fryze功率定义的检测方法、模拟带通滤波器检测方法、基于频域分析的FFT检测方法、同步测定法、自适应检测法、基于瞬时无功功率理论的畸变电流瞬时检测法等,此外还有基于小波变换的时变谐波检测法、基于鉴相原理的谐波电流检测法、基于人工神经网络的谐波检测法等。其中,根据1984年由H. Akagi等人提出的瞬时无功功率理论^[8]的谐波电流检测法实时性强,在有源滤波方面得到了广泛的应用。但这一方法忽略了零序分量的影响,在电压有畸变的情况下求出的谐波电流与实际值是有差别的,采用基于广义瞬时无功功率理论的 $dq0$ 变换^[9,10]则能更精确地实时检测出谐波电流。

2.2 控制策略

一旦检测、分析出存在的有关电能质量问题的信息,就必须采用有效的控制方法消除或抑制这些信息。采用何种控制方法与电能质量问题类型以及控制装置密切相关。

传统的一些用于稳态电压调整的装置,如并联电容器、并联电抗器、变压器分接头等都是机械式的,它们对电能质量问题反应速度慢、控制不精确、调节能力有限,过去一般采用手动控制的方法,现在有一部分装置采用了自动投切的方法,其控制策略既有非常简单的开环控制,也有采用模糊控制^[11]、智能控制^[12]等现代控制策略的。

基于电力电子技术、通过变流器与电力系统相连接的电能质量控制装置,例如SVG(静止无功发生器)、APF(有源电力滤波器)、DVR(动态电压恢复器)、DSTATCOM(即并联型DVR)、UPQC等的控制方法更多。对变流器PWM控制技术是目前最常用的控制方法,通过调节导通角 δ 和调制脉宽 θ 可以四象限控制能量存储装置与电网间的有功或/和无功交换,而且可以有效地抑制交流侧的谐波。

根据提取出的电能质量扰动信号来确定最终变流器的触发信号,目前研究及应用比较广泛的控制方法有以下几种:

a. PID控制:这是电力系统中最常用的方法,其理论完善、鲁棒性强、稳定性好、稳态精度高,易于在工程中实现。经典PID控制采用比例、积分、微分等典型的控制模块,加上几种校正网络,能改善系统动态、稳态性能。但PID控制也存在响应有超调、对系统参数摄动和抗负载扰动能力差等缺点,因此出现

了变参数 PID 控制^[13]、将 PID 与变结构控制相结合^[14]等控制方法。

b. 滞环比较控制:目前在跟踪谐波电流方面应用最广泛的控制方法是滞环比较控制。滞环比较控制的原理是将被控制量与它的给定值在给定范围内进行比较以确定电能变换器开关元件的开关时序。滞环比较控制具有反应速度快、控制精度高、容易实现和不需要了解负载特性等优点;主要缺点是开关频率不固定,用于三相三线系统时有严重的相间干扰,在负载换路时被控制量往往不能得到有效控制等。与矢量控制等方法相结合可以有效地克服上述缺点^[15]。

c. 空间矢量控制:空间矢量控制的原理是将测量得到的基于三相静止坐标系的交流量(abc)经过 Park 变换得到基于两相旋转坐标系的直流量(dq),实现解耦控制,具有良好的稳态性能与暂态性能。常规的矢量控制方法需要进行复杂的正弦、反正切函数运算,一般采用 DSP 进行处理;为了缩短实时运算时间和降低对硬件的要求,可以采用一些简化算法^[16]。

d. 无差拍控制:K. P. Gokhale 等人在 1987 年首先提出逆变器无差拍控制方法,它的主要思想是根据系统的状态方程和当前的状态信息推算出下一周期的开关控制量,最终达到使输出量跟踪输入量的目的。采用无差拍控制可以消除稳态误差,并在最短的时间内结束过渡过程;但它也存在鲁棒性较差、瞬态响应超调量大、计算实时性强因而对硬件要求很高等缺点。采用带扰动状态观测器的无差拍控制或最优预见控制技术都可以大大改善无差拍控制的性能^[17]。

e. 反馈线性化:直接反馈线性化(DFL——direct feedback linearization)方法即通过对系统非线性因素的精确补偿,将原系统转换为线性系统,即可用线性控制理论加以控制。

f. 非线性鲁棒控制:考虑 SMES(超导储能装置)实际运行时会受到各种不确定性的影响,因此可通过对 SMES 的确定性模型引入干扰,得到非线性二阶鲁棒模型。对此非线性模型,既可应用反馈线性化方法使之全局线性化,再利用所有线性系统的控制规律进行控制^[18];也可直接采用鲁棒控制理论设计控制器。以某种性能指标的优化为设计依据的鲁棒控制理论最典型的代表就是加拿大学者 G. Zames 于 1981 年开创的 H_∞ 控制理论。该理论目前已经发展得比较成熟,成为分析和设计不确定系统的有力工具。

g. 自适应控制:实际的 SMES 系统在运行过程中必然会受到负载扰动及其他环境因素变化的影响。采用常规的控制器,以一组不变的控制器参数去

适应各种变化显然难以取得满意的结果。自适应控制方法可以在线辨识系统模型,然后根据系统模型和控制指标及时整定控制器参数,实现高精度控制^[19]。

h. 模糊逻辑控制:用经典控制理论的“频域法”和现代控制理论的“时域法”设计控制器时,必须知道被控对象精确的数学模型。自适应控制、自校正控制虽然在很大程度上降低了对建模精度的要求,但需要使用大量的先验数据,而且要对模型进行在线辨识,算法复杂、计算量大,限制了其应用范围。模糊控制作为一种智能控制方法,不需要对系统建立精确的数学模型,通过对系统特征的模糊描述,可以大大降低获取系统动态和静态特征量付出的代价^[20]。模糊控制有较强的鲁棒性,对外来干扰、过程参数变化和非线性因素均不敏感。但模糊控制存在稳态误差,在工作点附近容易引起小范围振荡。可以将其他控制方法与模糊控制相结合,如变结构控制、人工神经网络等,从而改善模糊控制的性能。

i. 人工神经网络(ANN):人工神经网络具有自适应和自组织能力,可以根据输入、输出学会它们之间的非线性关系,而不需要系统的数学模型;ANN 的容错性和自适应性可以应付复杂系统在运行过程中的众多不确定因素,提高系统的抗干扰能力;ANN 固有的并行结构和并行处理能力使它可以快速处理系统的大量数据。

3 电能质量控制技术的发展趋势

电能质量控制是一个复杂的系统工程,它涉及到电力系统、电力电子、自动控制等多个方面。

目前国外有关电能质量控制的研究正掀起高潮,其内容包括所适用的功率理论的扩展,电能质量评价指标体系的建立,新的电能质量分析方法的提出,以及基于用户电力技术的电能质量控制装置的设计与实现。国际上比较知名的几家大公司都已经生产出了自己的电能质量调节器,如西门子的 SIPCON-S, GE 的 SSVR(static series voltage regulator), ABB 的 DVR, 以及 Softswitching 的 DSC(dynamic sag corrector)。Westinghouse 为美国电科院研制的世界上第 1 台 DVR 已于 1996 年 8 月投入工业运行;美国 IGC 和 ASC 的小型(1 MJ~10 MJ)低温 SMES 已经商品化,日本、德国、法国和意大利等也都对低温 SMES 展开了深入的研究。

我国在电能质量方面的研究总的来说才刚刚起步,大部分研究都局限在谐波和无功补偿的范围内,与国外还存在着很大的差距。各种 APF, SVC, UPQC, DVR 等电能质量补偿装置仍处在理论研究和实验研究阶段。西安交通大学已研制出 120 kVA

并联型有源电力滤波器,中国科学研究院电工所、清华大学电机系也已研制出小型 SMES 样机。

结合目前国内外电能质量的研究现状以及社会发展对电能质量提出的新要求,应在以下 3 个方面对电能质量控制技术进行研究和完善:

a. 基础理论研究:电能质量评价指标的科学界定以及各项指标的合理计算方法,新的分析与控制方法的研究,新的电能质量控制装置并网运行对系统可能产生的影响(包括稳态与动态性能)等。

b. 积极采用其他领域的新技术,为电能质量控制技术带来新的活力:采用基于高速数字信号处理器(DSP)的数字化控制装置取代传统的用模拟量控制的电能质量控制装置,用固态电子开关取代常规高压开关以实现同步开断,利用燃料电池和微型燃气轮机等分布式清洁能源提高供电可靠性和电能质量,计算机和通信技术的发展使得电能质量远程监测成为可能^[21],大功率、可自关断电力电子器件与现代控制技术相结合研制出新型的电能质量调节装置,超导电力装置(SMES 和 SFCL(超导故障限流器))也将在提高供电质量方面发挥重要的作用。

c. 大力发展用户电力技术(custom power):这是一种应用现代电力电子技术和控制技术为实现电能质量控制和为用户提供用户特定要求的电力供应的技术。DVR 和 DSTATCOM 是用户电力技术控制器的典型代表。用户电力技术与 FACTS 本质上是一样的,其差别仅是额定电气值不同,前者应用于配电网,后者应用于输电网,因此用户电力技术也可称为配电网的 FACTS 技术(D-FACTS)。

4 结语

电能质量的好坏直接影响社会生产、生活的各个方面,提供和维护高品质的电力能源,不仅是电力部门的责任,也是全社会共同追求的目标。满足其中每一个用户的电力供应需求,实现可靠性和经济性的协调和统一。

参考文献

- 陈警众(Chen Jingzhong). 电能质量讲座(第 2 讲)(Lectures on Power Quality; Part 2). 供用电(Power Supplying and Consuming), 2000, 17(4): 52~55
- Chowdhury H B. Power Quality. IEEE Potentials, 2001, 20(2): 5~11
- 王建斌, 李威, 纪延超, 等(Wang Jianyi, Li Wei, Ji Yanchao, et al). 电能质量监测算法研究及实现(The Study and Realization of Power Quality Supervisory Method). 继电器(Relay), 2001, 29(2): 29~31
- 文继锋, 刘沛(Wen Jifeng, Liu Pei). 一种电能质量扰动的检测和分类方法(A Method for Detection and Classification of Power Quality Disturbances). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(1): 42~44
- 张斌, 刘晓川, 许之晗(Zhang Bin, Liu Xiaochuan, Xu Zhihan). 基于变换的电能质量分析方法(Power Quality Analyzing Method Based on Transformation). 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(1): 26~29
- 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等(Xu Yonghai, Xiao Xiangning, Yang Yi-han, et al). 小波变换在电能质量分析中的应用(Application of Wavelet Transformation in Power Quality Analysis). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(23): 55~58
- 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等(Xu Yonghai, Xiao Xiangning, Yang Yi-han, et al). 基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识(Power Quality Disturbance Identification Using dq Conversion-based Neural Classifier). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(14): 24~28
- Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. IEEE Trans on Industry Application, 1984, 20(3): 625~630
- 叶忠明, 董伯藩, 钱照明(Ye Zhongming, Dong Bofan, Qian Zhao-ming). 谐波电流的提取方法比较(Comparison of Harmonic Current Picking-up Methods). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(12): 21~24
- 李庚银, 陈志业, 丁巧林(Li Gengyin, Chen Zhiye, Ding Qiaolin). 用于有源补偿器的广义瞬时无功电流实时检测方法(Real-time Detection Methods of Generalized Instantaneous Reactive Currents Used for Active Compensators). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10): 28~31
- 马瑞军, 程林, 郭一杰, 等(Ma Ruijun, Cheng Lin, Guo Yijie, et al). 运用模糊控制理论的并联电容器投切方式(The Shunt Capacitor Bank Control Method Using Fuzzy Control Theory). 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 1998, 25(3): 24~28
- Hsu Y Y, Lu F C. A Combined Neural Network-fuzzy Dynamic Programming Approach to Reactive Power/Voltage Control in a Distribution Substation. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1265~1271
- 曹路, 李海峰, 陈珩, 等(Cao Lu, Li Haifeng, Chen Heng, et al). 用于 TCSC 阻抗控制的变参数 PID 方法(Variable Parameter PID Control Method for TCSC Impedance Control). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(24): 7~10
- 刘伯春(Liu Bochun). 滑模变结构及 PID 组合调节器在 PWM 伺服系统中的应用(The Association Regulator with Sliding Mode Variable Structure Controller and PID in PWM Servo System). 电气传动自动化(Electrical Drive Automation), 1994, 16(3): 21~26
- Luigi Malesani, Paolo Tenti. A Novel Hysteresis Control Method for Current-controlled Voltage-source PWM Inverters with Constant Modulation Frequency. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 26(1): 88~92
- 浦志勇, 黄立培, 吴学智(Pu Zhiyong, Huang Lipai, Wu Xue-zhi). 三相 PWM 整流器空间矢量控制简化算法的研究(Research on Simplified Algorithm of the Three-phase Rectifier with Space Vector Control). 电工电能新技术(Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2002, 21(2): 56~60

(上接第 31 页 continued from page 31)

- 17 魏尚明,何少雄,陈国雄(Wei Shangming, He Shaoxiong, Chen Guoxiong). 补偿扰动的 PWM 逆变器无差拍控制(Deadbeat Controlled PWM Inverter with Disturbance Compensation). 上海交通大学学报(Journal of Shanghai Jiaotong University), 1998,32(6):119~123
- 18 关天祺,梅生伟,卢强,等(Guan Tianqi, Mei Shengwei, Lu Qiang, et al). 超导储能装置的非线性鲁棒控制器设计(Design of Nonlinear Robust Controller of SMES). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001,25(17):1~5
- 19 Tzou Y Y, Jung S L, Yeh H C. Adaptive Repetitive Control of PWM Inverters for Very Low THD AC-voltage Regulation with Unknown Loads. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(5): 973~981

- 20 Suttichai Saetieo, Torrey D A. Fuzzy Logic Control of a Space-vector PWM Current Regulator for Three-phase Power Converters. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(3): 419~426
- 21 McGranaghan Mark. Trends in Power Quality Monitoring. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(110): 3~10

朱桂萍(1973—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为电能质量控制、超导技术在电能质量控制方面的应用。
E-mail: gpzhu@tsinghua.edu.cn

王树民(1946—),男,副教授,主要研究方向为电能质量控制、谐波治理及无功补偿。

A SURVEY ON POWER QUALITY CONTROL TECHNOLOGY

Zhu Guiping, Wang Shumin

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Power quality can be categorized into three aspects of voltage quality, frequency quality and power supplying reliance. Most problems in power system are related with voltage quality. The latest evaluation guidelines of power quality are presented in the paper. The analyzing and controlling methods of power quality are proposed in detail, including PID control, vector control, deadbeat control, adaptive control, intelligent control and so on. The trend of power quality control technology is stated in the end.

Key words: power quality; PID control; vector control; deadbeat control; adaptive control; fuzzy control; custom power