非线性负荷对电网电能质量影响及优化治理研究

本文在前人研究的基础上对非线性负荷的畸变特性及畸变信号提取进行了分析，为电网电能质量的优化提供了基础，设计了补偿器控制的电网电能优化方案，为优质电能供应的治理提供了理论依据和研究方向。

黄军琴　曹瑜伟/国网河南省电力公司平顶山供电公司

黄军琴/助理工程师

关键词/Keywords

电网电能质量·
非线性负荷·
畸变功率·
自适应陷波器·
补偿器控制·

0　引言

国民经济在当前环境下得到了飞速的发展，经济与技术是难以分割的两个环节，而在技术的具体表现中，电力电子及自动化设备的发展占着很大的比重，设备的精密化和复杂化对动力的要求逐渐增加，而提供优质电网电能质量是必要条件，但是设备作为负荷的非线性特征影响着电能质量，怎样从优质电能供应和非线性负荷大量使用的矛盾中寻求合理化方案，成为了人们关注的内容。本文从电能质量评价指标和非线性负荷的畸变特性出发，探索了负荷畸变信号的采集算法和非线性负荷对电能质量影响减小的优化方案，以期为我国电能质量优化提供理论基础和努力方向。

针对电网电能质量及优化的研究，许多学者做出了努力，正是这些学者的努力为我国的优质电能供应发展提供了科学依据。其中，张源渊于2013年对电网中多种典型干扰源进行了分析，给出了适合于评估分析的谐波电流含有律值的计算方法[1]；刘书铭等人于2012年对中高压配电网中十余种典型电能质量干扰源的用电特性进行了分析，为电力部门电能管理和电力用户的电能质量治理提供了有效措施[2]；陈金玲等人于2011年根据非线性负荷的功率特性提出了一种全新的电能计算实现方案，为非线性负荷的计量做出了贡献[3]。

1　电网电能质量标准概述及非线性负荷电能计算原理

随着电力系统中电力电子设备的广泛使用，使得当前电能质量出现了一系列的问题，影响电能质量的表现类别基本分为七类，如表1所示。

表1 影响电能质量的表现类别

1	2	3	4	5	6	7
电压暂断	电压暂升	电压暂降	电压恒断	波形畸变	电压波动	频率变化

上述七类电能质量问题的引起源头在于电力电子设备负荷的非线性特征，为了更加精准地找出影响电能质量的原因，针对电力电子设备负荷的非线性特征研究是必须的，也就是说要有准确的非线性负荷电能计量算法才能有针对性地提出优化电能质量的科学方法。首先针对电能质量的标准进行概述，以期为电能质量优化提供目标；然后针对传统的非线性负荷电能计量和自适应陷波器电能计量原理进行分析，以期为电能计量的精准化提供理论依据。

1.1 电网电能质量标准概述

电能质量指的是优质供电，为了对电能质量进行更加准确的分析，本节从供电质量、用电质量、电压质量和电流质量四个方面进行阐述，以期为电能计量和质量优化提供改进方向。

中国知网 https://www.cnki.net

1）供电质量：供电质量可以从技术含义与非技术含义两个方面进行评述。其中技术含义主要指的是电压质量与供电的可靠性；而非技术含义指的是供电部门与用电个体之间的和谐程度。

2）用电质量：对于用电质量的评述也可以从技术含义方面的电流质量和非技术含义方面的缴费信誉两个方面进行。

3）电压质量：一般可以用给定电压与理想电压之间的偏差情况反映电压的质量。出现的偏差大，则电压质量差；出现的偏差小，则电压质量好。

4）电流质量：对于电流质量的评述，一般从电流谐波、间谐波、次谐波和噪声等方面进行，反映的是电流与理想正弦波形之间的偏差情况，同理给定电流与理想的正弦波形电流之间的偏差程度可以衡量电流质量的优劣。

因此，电能质量的定义可以总结为“导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差”，定义中的“偏差”除了包含供电系统的稳态性能外，还包括暂态性能。对于电能质量标准指定的任务，主要从当前的技术水平出发，以一定的电能质量指标偏差的允许值进行衡量，这样就引出了电能质量标准的合理性评判，电能质量标准的根本准则具体如下：

1）能够保证电力系统的安全、连续供电以及经济运行。

2）能够保证用电个体的电气设备正常用电。

3）在当前的技术水平下，电能质量指标偏差值达标。

对于电能质量评价的主要指标，可以从电压偏差、频率偏差、谐波含量、电压波动和善变以及三相电压不平衡五个方面进行，其中谐波指的是一个周期电气量的正弦波分量，谐波产生的原因主要有如式（1）所示的电流源、如式（2）所示的非线性时不变负荷两端的电流和如式（3）所示的时变负荷的电流特征。

$$i_s(t)=\sum_{h=0}^{m}\sqrt{2}I_h\sin(h\omega_1 t+\varphi_h) \quad (1)$$

$$i(t)=\frac{3}{2}\sqrt{2}kU_1^3\sin\omega_1 t-\frac{1}{2}\sqrt{2}kU_1^3\sin 3\omega_1 t \quad (2)$$

$$i_s(t)=\frac{\sqrt{2}}{2}U_1G_0\left[\cos(\omega_1-\omega_g)t-\cos(\omega_1+\omega_g)t\right] \quad (3)$$

式中，ω_1为输入电压的频率，当ω_g是ω_1的偶数倍时，$i(t)$中的频率是ω_1的奇数倍；而当ω_g是ω_1的奇数倍时，$i(t)$中的频率就是ω_1的偶数倍。

通过谐波产生的三种原因可知，系统谐波长是某些负荷或设备的非线性特征，也就是说电压和产生的电流之间的关系呈非线性。

1.2 非线性负荷电能计算原理

我国电网中的非线性负荷逐年增多，张晓冰于2007年提出了一种对非线性负荷条件下电能准确合理计量的新方法，即消耗的电能应为全电能与畸变电能之差[4]。为了对非稳态畸变信号条件的交流电网信号进行研究，本节对电网模型进行了如图1所示的简化处理，图1中，$u(t)$为电网的正弦电压源电压；$i(t)$为电网的电流；Z_L为电网线路的阻抗，其中Z为非线性负荷的阻抗。

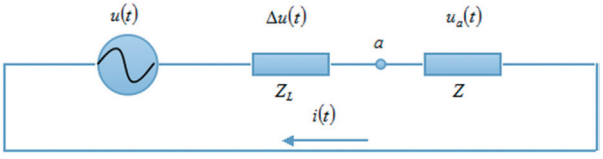

图1 交流电电网简化模型框图

图1中，点a处的电压$u_a(t)$和流入点a处的电流$i(t)$可以表示为

$$\begin{cases}u_a(t)=u_B(t)+u_S(t)\\ i_a(t)=i_B(t)+i_S(t)\end{cases} \quad (4)$$

式中，基波的下角标为B，畸变的下角标为S，这样就可以得出线路阻抗压降$\Delta u(t)$的表达式为

$$\Delta u(t)=\Delta u_B(t)+\Delta u_S(t) \quad (5)$$

根据功率的电压乘以电流的原理，可以得出点a处的瞬时功率$P_a(t)$和平均功率P_a的表达式为

$$\begin{aligned}P_a(t)&=u_B(t)i_B(t)+u_B(t)i_S(t)+u_S(t)i_B(t)+u_S(t)\ i_S(t)\\&=P_B(t)+P_{BS}(t)+P_{BS}(t)+P_{SB}(t)+P_S(t)\\\overline{P}_a&=\frac{1}{T}\int_0^T P_a(t)\,dt=\frac{1}{T}\int_0^T(P_B(t)+P_{BS}(t)+P_{SB}(t)+\\&P_S(t))\,dt=\overline{P}_B+\overline{P}_{BS}+\overline{P}_{SB}+\overline{P}_S\end{aligned} \quad (6)$$

式中，$\overline{P}_B$为非线性负荷吸收的基波平均功率；$\overline{P}_S$为非线性负荷吸收的畸变平均功率；$\overline{P}_{BS}$为非线性负荷吸收的基波电压与畸变电流产生的平均功率；$\overline{P}_{SB}$为非线性负荷吸收的畸变电压与基波电流产生的平均功率。

式（6）中的四种平均功率根据功率潮流方向分析可以得出如下结论：

中国知网 https://www.cnki.net

1）若$\overline{P}_a \leqslant 0$时，则表示基波电压与基波电流所产生的功率为非正功率。

2）若$\overline{P}_{BS} < 0$时，则表示基波电压与畸变电流产生的功率为负功率。

3）若$\overline{P}_{SB} > 0$时，则表示畸变电压与基波电流产生的功率为正功率，以基波电流的形式回馈到电网，会对电网的质量产生影响。

4）若$\overline{P}_S > 0$时，则表示畸变功率为非负功率，此时以畸变电流的形式反馈给电网，并且对电网电能质量不产生影响。

由此可知电网供电的电能平均功率$\overline{P}$计算式为

$$\overline{P} = \overline{P}_B + \overline{P}_{BS} + \overline{P}_{SB} = \overline{P}_a - \overline{P}_S \tag{7}$$

若对畸变信号进行研究，首先需要对基波信号进行滤波处理，本节采用自适应陷波器对基波信号进行滤除，最终得出畸变信号；然后再对畸变信号进行分析，得出非线性负荷对电网质量影响的根源，以期为电网电能质量的优化提出可行性建议。

本文的自适应陷波器选用的是LMS算法，若用$d(k)$表示对原始输入信号采样后得到的样本信号，用$x_1(k)$和$x_2(k)$分别表示对与当前基波频率相同的纯正弦波离散后得到的参考输入和经过90°相移后的参考输入，用$e(k)$表示最终输出，则最终畸变信号$e(k)$的权矢量方程表示为

$$\begin{cases} w_i(k+1) = w_i(k) + 2\mu e(k) x_i(k) \\ y(k) = \sum_{i=1}^{2} w_i(k) x_i(k) \\ e(k) = d(k) - y(k) \\ i = 1,2 \end{cases} \tag{8}$$

式中，$w_1(k)$和$w_2(k)$表示的是两个权值，其目的在于作用组合后的正弦波振幅与相角能够和原始输入中的干扰分量的相角与振幅相同，这样就可以使最终输出$e(k)$中的频率ω_0的干扰消除，为获取更加精准的畸变信号提供了基础；参数μ表示的是控制算法收敛速度与稳定性的参量，如果采样周期用符号T表示，可以得出Z变换陷波器的传递函数，即

$$H(Z) = \frac{E(Z)}{D(Z)} = \frac{1}{z^2 - 2z\cos\omega_0 T(1-\mu c^2) + (1-2\mu c^2)} \quad z^2 - 2z\cos\omega_0 T + 1 \tag{9}$$

由传递函数可以得出自适应陷波器原理，如图2所示。

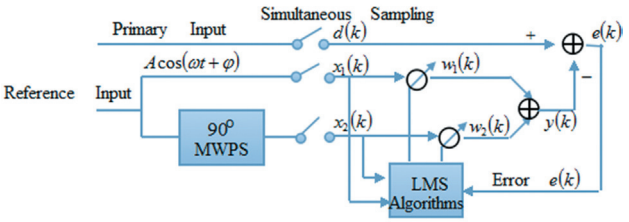

图2 自适应陷波器原理

2 基于补偿器的电网电能质量优化方案

2.1 补偿器控制原理分析

补偿器用来消除电网局部非线性负荷谐波和不平衡的影响，并且在此基础上向非线性负荷提供预先指定量的有功功率，为电流和电压的平稳化过程提供补偿，因此从补偿的期望效果分析可知，经过补偿器后的电网电流和电压会出现平衡的现象，三相交流电流在平衡状态下节点处的电流加和为0，同时电压的平均值会出现恒定的状态，变换器的单相等效电路如图3所示。

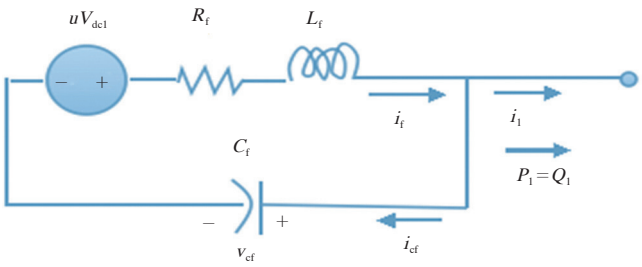

图3 变换器单相等效电路

图中，uV_{dc1}为变换器输出电压，其中u的取值为+1或−1，表示的是开关函数，而变换器控制的主要作用是产生开关函数，因此选择如式（10）所示的状态矢量。

$$x^T = \begin{bmatrix} i_1 & i_{cf} & v_{p1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中，v_{p1}为公共连接点处的电压，且有$v_{p1} = v_{cf}$，则系统的状态矢量空间可以表示为

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu_c \\ x(k+1) &= Fx(k) + Gu_c(k) \end{aligned}\right\} \Rightarrow u_c(k) = -K\left[x(k) - x_{ref}(k)\right] \tag{11}$$

式中，u_c为开关函数在连续时间上的形式；$u_c(k)$

中国知网 https://www.cnki.net

为开关函数的离散时间形式。

通过线性二次控制可以得到最终的收益矩阵，即

$$\begin{array}{rl} \text{if} & u_c(k) > b \quad \text{then} \quad u = +1 \\ \text{else if} & u_c(k) < -b \quad \text{then} \quad u = -1 \end{array} \tag{12}$$

式中，b值为非常小的一个设定值，可以根据实际情况进行自适应设定。

2.2 补偿器电网电能优化效果分析

补偿器电能质量优化算法的仿真环境为PSCAD/EMTCD，与唐山市曹妃甸区唐海镇的电网共同分担负荷时，公共连接点PCC1和PCC2处的系统仿真数据如表2所示。

表2 PSCAD/EMTCD环境下系统仿真参数一览表

Voltage drop at PCC1			Voltage drop at PCC2		
Active power	Initial value / MW	Final value / MW	Reactive power	Initial value / Mvar	Final value / Mvar
P_1	0.275	0.274	Q_1	0.282	0.281
P_{G1}	1.125	1.125	Q_{G1}	1.120	0.119
P_{L1}	1.401	1.392	Q_{L1}	1.401	1.400
P_2	0.710	0.695	Q_2	0.420	0.410
P_{G2}	0.693	0.691	Q_{G2}	0.182	0.173
P_{L2}	1.401	1.348	Q_{L2}	0.601	0.584
Voltage drop at PCC1（%）			Voltage drop at PCC2（%）		
3.15			3.38		
Active power	Initial value / MW	Final value / MW	Reactive power	Initial value / Mvar	Final value / Mvar
P_1	0142	0.711	Q_1	0.090	0.432
P_{G1}	0.586	0.000	Q_{G1}	0.363	0.000
P_{L1}	0.712	0.693	Q_{L1}	0.451	0.433

由表2可知，运用补偿器对公共负荷变化下PCC1和PCC2两个公共连接点处的电网电能质量指标参数进行控制，可以在局部范围内达到电能质量优化的效果。

3 结束语

非线性负荷对电网电能质量影响的根本原因为其用电过程中造成的电压或电流畸变特性，若想对电网电能质量进行优化就要从消除畸变特性和维持供电有功功率稳定的角度出发，本文中给出了畸变信号的提取算法和补偿器控制方案，算法和方案对电能优化有着显著的效果，但在具体实现上较为复杂，而文中提供的补偿器优化方案可以作为一种指导思想，为了能够真正大规模地实现电网电能优化，还需要对设备和方案做进一步的研究。

参考文献

[1] 张源渊. 典型干扰源电能质量特性分析与治理措施研究[J]. 电力电气，2013.

[2] 刘书铭，等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(15)：150-155.

[3] 陈金玲，等. 自适应陷波器在非线性负荷电能计量中的应用[J]. 电测与仪表，2011，48(541)：10-12.

[4] 张晓冰. 畸变信号条件下电网功率潮流分析与电能计量新方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2007.

[5] 刘欢，等. 改进型自适应陷波器电力系统频率估计方法[J]. 上海海事大学学报，2007（9）：24-27.

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

黄军琴（1979-），女，助理工程师，本科，毕业于华北水利水电学院，研究方向：电力系统自动化。

曹瑜伟（1982-），女，助理工程师，硕士，毕业于华北电力大学，研究方向：电力系统营销自动化。

中国知网 https://www.cnki.net