

[电能质量]

数据中心电能质量问题分析及综合治理

文/中国移动通信集团设计院有限公司河北分公司 杨 昆
中移在线服务有限公司河北分公司 李 茜

通过研究数据中心各种通信电源设备和建筑负荷的负载特性，分析出数据中心380 V低压侧电能质量问题主要表现为无功和谐波，提出采用基于电压源型并网逆变器的电能质量综合补偿器（PQCC）对数据中心电能质量问题进行综合治理。

随着云计算和大数据发展和数据中心快速建设，电能质量问题会对数据中心各种电源和负载设备带来严重的无功和谐波危害。本文通过研究数据中心电能质量问题，分析主要电能质量问题性质，提出合理有效的电能质量治理方案，对提高数据中心供电可靠性，最大程度发挥数据中心运行效益、经济效益和社会效益具有重要意义。

数据中心电能质量问题分析

数据中心供电系统10 kV高压侧电能质量问题主要表现为感性无功，通常采用并联电容器就可以解决。而变压器低压侧与各种电源设备，IDC、交换、传输等通信负荷，照明及水泵等建筑负荷直接电气连接，自身既是电能质量问题的主要来源，又受电能质量问题影响，是数据中心电能质量治理的重点。

1. UPS电源及交流通信负荷

工频UPS电源前级通常采用相控整流电路将交流电转化为直流电，再通过逆变器给负载供电。相控整流电路通过触发延迟角调节各晶闸管导通时间，从而调节直流侧电压，只有当晶闸管承受正向电压且触发信号到来，才有电流流过器件，电流总是滞后电压，并且由于晶闸管工频开关工作，负载特性表现为感性无功和低次谐波。相控整流电路为降压电路，需要采用变压器升压后逆

变供电，变压器容量与UPS额定容量相当，因此表现为较大感性负载。蓄电池组容性负载特性较低，滤波电容容量也较小，因此总体上工频UPS电能质量问题表现为感性无功和谐波。

高频UPS电源前级整流电路采用IGBT构成PWM整流电路，因此没有感性无功问题，主要为IGBT开关工作产生的高次谐波，滤波电容和蓄电池组为容性特性，因此高频UPS电能质量问题主要表现为高次谐波和容性无功，而开关频率在几千赫到十几千赫之上，谐波次数较高，在线路中衰减较快，可以忽略。

2. 开关电源

-48 V开关电源，336 V或240 V高压直流电源电能变换原理相同，都由AC/DC整流电路、PFC功率因数校正电路、DC/DC电压变换电路和蓄电池组构成。通常为了提高变换效率，节省成本，输入级通常由二极管不控整流电路构成，通过PFC电路校正电源输入功率因数，无功问题较小，主要表现为二极管非线性工作产生的低次谐波，若整流器采用PWM整流电路，低谐波问题也可以解决，主要为开关频率的高次谐波，同样可以忽略。滤波电容、支撑电容和蓄电池组为容性特性，因此开关电源电能质量问题表现为谐波和容性无功。直流通信负荷不存在无功问题，内部电源模块谐波不影响380 V母线，且开关电源为三相

对称负载,也没有不平衡问题。

3. 建筑负荷

建筑类负荷总体电能质量问题为谐波、感性无功和三相不平衡。目前工频UPS电源在数据中心很少使用,而高频UPS电源和开关电源的高次谐波可以忽略,通过合理的负荷分配,可以大致保证三相平衡。在数据中心配电系统设计时,通常将通信负荷和建筑负荷分开,分别设置通信负荷变压器和建筑负荷变压器。综合分析可知,数据中心中通信负荷变压器低压侧电能质量问题主要为容性无功,而建筑负荷变压器低压侧电能质量问题主要为低次谐波和感性无功。

数据中心电能质量问题治理方案

1. 并联电容器、无源滤波器及晶闸管投切型补偿

采用并联电容器+无源滤波器进行无功和谐波补偿,可以补偿感性无功和固定次数谐波,同样存在补偿精度不高、不能连续变化等问题,且补偿设备改变电源系统阻抗,容易引起并联谐振。晶闸管投切型TCR、TSC等设备可以实现无功连续变化,但是响应速度慢,谐波严重,容易产生振荡。

2. SVG+APF有源电能质量治理

目前数据中心常用的电能质量治理设备为静止无功发生器SVG和有源电力滤波器APF的组合设备,前者补偿无功、后者补偿谐波,拓扑结构和等效电路如图1所示。两种设备本质上都是电压源型并网逆变器,逆变器输出可以看作是一个与380 V母线并联的可控电压源,通过调节逆变器输出电压的幅值、相位及频率,产生需要补偿的无功电流和谐波电流注入到低压母线,抵消负载的无功和谐波。由于输出电压可以连续变化,因此输出电流幅值、相位也连续变化,且电流频率随电压变化、叠加,即连续补偿容性、感性无功以及谐波。

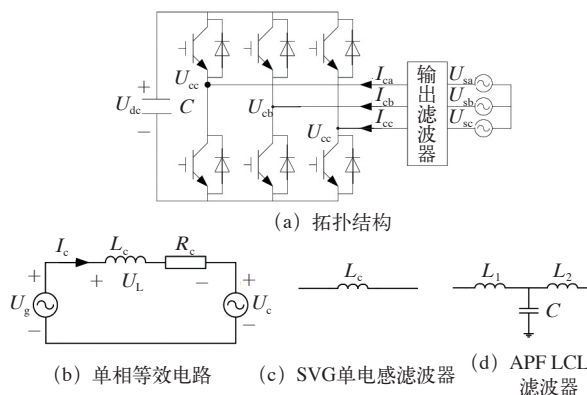


图1 SVG和APF拓扑结构、等效电路

SVG和APF电路结构上的不同点在于输出滤波器的设计。由于SVG只补偿基波无功,输出滤波器主要作用是滤除高频谐波,因此仅需要采用单电感一阶滤波器,对高频谐波以20 dB倍频衰减,电感量越大,滤波能力越强。APF要补偿低次谐波,输出滤波器既要滤除开关次谐波,又不能对补偿的低次谐波有较大阻抗,因此输出滤波器采用LCL二阶形式, L_1 和C对高次谐波呈低阻抗,构成高通滤波器,对高频谐波以20 dB倍频衰减;而总电感量 $L_1 + L_2 \ll L_c$,能够减小对低次谐波的阻抗,保证谐波补偿能力。

基于PQCC的电能质量问题综合治理

由于滤波器结构的不同,从补偿性能、减少损耗角度出发,通常SVG仅补偿基波无功;而从体积、成本角度出发,APF补偿无功经济效益较低,通常只补偿谐波;无功或谐波补偿的选择是通过不同指令计算方法以及电流跟踪控制方法实现的。但是二者硬件结构、工作原理相同,通过合理的滤波器参数选择,采用控制算法综合补偿谐波和无功,构成电能质量综合补偿器(PQCC),实现数据中心电能质量问题的综合治理,更具意义。

1. PQCC构成及数学模型

图2所示为基本的电压源并网逆变器型PQCC系统构成框图。其中, u_g 、 i_g 、 i_L 、 i_c 分别表示交流电网电压、电网侧电流、负载侧电流和PQCC输出补偿电流。PQCC系统由谐波、无功电流检测电路和补偿电流发生电路组成,主电路为PWM逆变器,除主电路和驱动电路外,信号采集、指令计算和电流跟踪控制通过DSP为核心的控制器实现。通过检测电路获得电网或负载电流,并通过指令电流运算电路计算负载无功、谐波作为无功电流的指令信号,根据指令电流信号电流跟踪控制电路计算出控制信号,通过驱动电路作用于逆变器,产生实际的补偿电流。

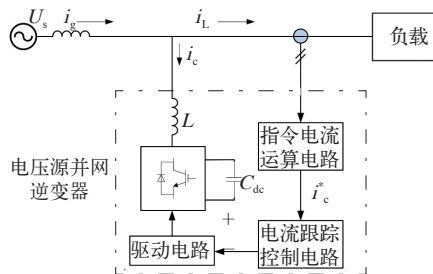


图2 PQCC电能质量治理构成框图

正常工作时PQCC直流侧电压稳定在 U_{dc} ，直流侧电压、交流侧电压和调制信号关系如式(1)所示，其中 M 为调制信号调至比； U_s 为调制信号有效值； ω_s 为调制信号角频率，控制其与电网角频率 ω_0 相同，即同步运行； δ 为调制信号相对于电网的相位角。

$$u_c = u_s = \frac{1}{2} MU_{dc} \sin(\omega_s t - \delta) \quad (1)$$

根据图1b所示的等效电路，以及KVL、KCL定律，列出PQCC交流侧输入、输出特性方程如式(2)所示

$$L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} - R_c \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用同步旋转坐标变换(dq变换)将三相abc静止坐标系中的时变微分方程变换为dq同步旋转坐标系下的常数微分方程，可得PQCC在dq同步旋转坐标系下的数学模型，如式(3)所示。

$$L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_c & \omega_0 L \\ -\omega_0 L & -R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{gd} + u_{cd} \\ u_{gq} + u_{cq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， u_{gd} 、 q 为电网电压的d、q轴分量， u_{cd} 、 q 、 i_{cd} 、 q 分别为PQCC交流侧电压和电流的d、q轴分量，d轴成为有功分量，q轴成为无功分量。在dq坐标系下PQCC的数学模型变成常系数微分方程。

2. PQCC控制策略及指令检测

dq坐标系下PQCC输出的d轴电流和q轴电流通过滤波电感耦合，同时电网电压扰动也会影响装置的输出。将式(3)进行拉普拉斯变换，得到PQCC在复频域下的数学模型，采用电流解耦及电压前馈控制。

电流解耦及电压前馈后，d、q轴电流相互独立，不存在任何耦合联系。反馈PQCC输出电流，计算出d、q轴分量，分别采用d轴和q轴电流控制器 $G_{id}(s)$ 、 $G_{iq}(s)$ 进行闭环控制，使PQCC输出电流的d、q轴分量跟随指令电流 i_{dref} 、 i_{qref} 的变化，从而实现无功和谐波综合补偿。

数据中心负载特性电流 i_{La} 、 b 、 c 可以表示为式(4)所示基波和谐波分量叠加的形式，式中： I_f 、 I_h 分别代表基波和各次谐波电流有效值， φ_f 、 φ_h 分别为基波和各次谐波相位， h 为谐波次数，三相电路中只有非零序奇数次谐波。

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \varphi_f) \\ \sin(\omega_0 t + \varphi_f) - \frac{2\pi}{3} \\ \sin(\omega_0 t + \varphi_f) + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} + \sum_{\substack{h=6k \pm 1 \\ k=1,2,3,\dots}} \sqrt{2} I_h \begin{bmatrix} \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) \\ \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) - \frac{2h\pi}{3} \\ \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) + \frac{2h\pi}{3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将负载电流dq变换有式(5)，可知，在dq坐标系下，三相负载电流基波转换为d、q轴直流分量，各次谐波根据谐波正、负序转化成原谐波次数减、加一次的谐波分量，即 $6k$ 次谐波。由于基波频率为 $f_0 = 50$ Hz，dq坐标系下除直流分量外，最低次谐波频率为 $6f_0 = 300$ Hz，采用低通滤波器提取 i_{Ld} 中的直流分量 i_{Ldf} ，将 i_{Ld} 与 i_{Ldf} 作差后即获得d轴补偿电流指令 i_{dref} ， i_{Lq} 即为q轴补偿电流指令 i_{qref} ，其中包含基波无功量 i_{Ldf} 量和谐波q轴分量。

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \sqrt{3} I_f \begin{bmatrix} \cos \varphi_f \\ \sin \varphi_f \end{bmatrix} + \sum_{\substack{h=6k \pm 1 \\ k=1,2,3,\dots}} \sqrt{3} I_h \begin{bmatrix} \cos[(h \mp 1)\omega_0 t + \varphi_h] \\ \sin[(h \mp 1)\omega_0 t + \varphi_h] \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 仿真验证

利用Matlab/Simulink仿真软件搭建如图2所示的PQCC仿真平台，验证装置电能质量综合治理功能和本文提出控制策略的正确性。将仿真负荷设置为容性和谐波负载，仿真结果如图3所示，仿真波形分别为380 V母线三相电压和三相电流。

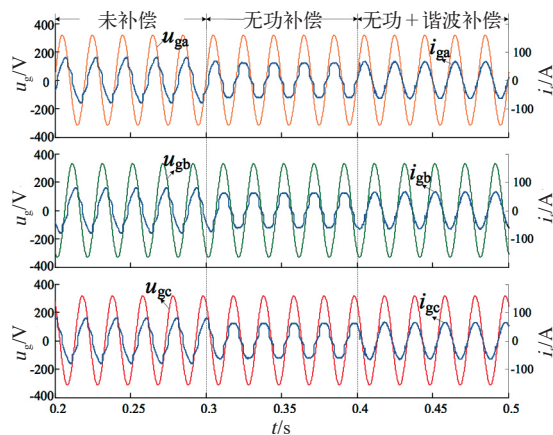


图3 PQCC电能质量问题综合质量仿真波形

结束语

有源电能质量治理设备SVG和APF的本质是电压源型并网逆变器，合理设计其电路参数，采用适当控制策略构成电能质量综合补偿器，可以对数据中心谐波、无功等电能质量问题进行综合治理，仿真结果验证了提出方法的可行性和有效性。EA

(收稿日期：2018.05.21)

(编辑：朱金凤)