

逆变型分布式电源控制系统的应用设计

王志群, 朱守真, 周双喜

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 分布式发电系统并网运行时外特性控制是关系到其应用的关键问题之一。根据并网分布式电源的可控拟负荷外特性, 设计了采用电流正弦脉宽调制(PWM)调节方法的电压型逆变控制器, 整个体系充分考虑提高电能质量水平。该控制器的核心采用含有直流电压波动前馈补偿的双环串级 PI 结构。第 1 级为功率调节器, 选择公共连接点(PCC)电压、电流作为反馈量, 有功、无功可以分开独立调节; 第 2 级为电流调节器, 选择逆变器输出电流作为反馈量, 考虑电流反馈解耦补偿, 响应速度快。直流电压前馈补偿则可以降低直流侧缺少储能引发输入电压波动对控制效果的影响。输出滤波器的考虑则可进一步提高电能质量水平。仿真结果表明电流正弦 PWM 的双环串级 PI 控制系统能够较好地维持逆变型分布式电源恒功率电压源的拟负荷外特性, 简单实用、设计灵活, 可以得到较好的谐波注入。

关键词: 分布式发电; 电压源逆变器控制; 恒功率电压源; 双环串级 PI 调节

中图分类号: TM761

0 引言

部分中小容量的分布式发电(DG—distributed generation)系统须经整流逆变接口才能与负荷或电网相连, 目前针对分布式发电系统的逆变器研究尚不多见。逆变器常应用于有源滤波、无功动态补偿等领域^[1]。分布式电源究竟适宜采用电压型逆变器(VSI—voltage source inverter)还是电流型逆变器(CSI—current source inverter)还没有定论^[2,3]。VSI 易进行脉宽调制(PWM—pulse width modulation)、无差拍和重复等多种控制^[4~7], 有效实用, 已经在风力发电、太阳能光伏发电等孤立系统中得到了初步应用^[8]。应用中对 VSI 进行适当控制, 能够确保分布式电源出口电压基本维持恒定, 并保持严格的频率水平。分布式电源接入电网运行乃大势所趋, 故须研究适合中小容量逆变型分布式电源并网运行的控制方式, 使其能够保持系统可接受的外特性。研究并网运行的分布式电源的逆变器接口及其外特性是解决分布式电源应用的关键之一。

不同利益群体提出了多种不同的分布式电源的运行方式, 归纳起来有 3 类: “有功出力+电压”可调模式、“有功出力+无功出力”分别可调模式、恒功率

因数模式。美国对分布式电源应用和市场前景的调查表明, 电力公司普遍认为从电网角度分布式电源最好能表现得如“负荷”一般。从我国配电系统的实际情况角度考虑, 本文认为从公共连接点(PCC)来看, 中小型的分布式电源以恒功率拟负荷的外特性为宜, 关系上类似负荷, 但并不完全吸收功率。这样可尽量避免分布式电源直接参与馈线的电压调节。

本文根据并网分布式电源的可控拟负荷外特性, 设计了采用电流正弦 PWM 调节方法的联网分布式电源 VSI 的综合控制器。该控制器的核心采用含有直流电压波动前馈补偿的串级双环 PI 控制结构, 整个体系充分考虑了动态过程中原动机调节的积极配合以及提高电能质量水平。

1 分布式电源的逆变器接口

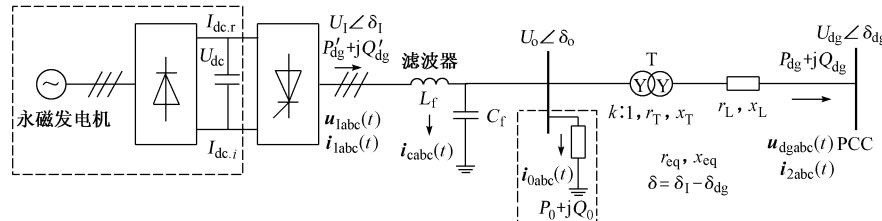
分布式发电从接口方式上目前有电力电子逆变器接口和常规旋转电机接口两大类。电力电子逆变器接口通常用于中小容量燃气轮机发电、风力发电机组以及以直流电形式存在的太阳能光伏、燃料电池等系统。这些分布式电源所发电能无法直接供给交流负荷, 须经过逆变器换流过程变成工频。

1.1 等值系统结构

并网逆变型分布式电源表示为图 1 所示的等值结构, 原动机拖动发电机发出非工频交流电, 经整流后转换为直流电; 再经电容平波, 以两电平的形式逆变成工频交流电。与有关文献一般考虑逆变器直接经电抗连接到配电网不同, 本文考虑逆变器输出

首先经电感-电容(LC)滤波器滤波后,再通过隔离变压器以及一段线路连接到配电网的PCC。LC二阶滤波器可以为分布式电源提供更佳的电能质量输出。隔离变压器也有双重作用:一方面避免分布式

电源的零序或直流分量进入配电系统,另一方面也作为很重要的谐波电流的滤波电抗。根据图1,假设变压器无移相作用,可以获得输出稳态电压、稳态电流间的相量关系。



U_1 、 U_0 、 U_{dg} 分别为逆变器端口、滤波器端口和 PCC 处电压的幅值; δ_1 、 δ_0 、 δ_{dg} 为对应的相角; $\mathbf{u}_{labc}(t) = [u_{la}(t), u_{lb}(t), u_{lc}(t)]^T$, 为逆变器端口三相电压构成的瞬时向量(下文将时间符号省略); \mathbf{u}_{dgabc} 为 PCC 三相电压向量; i_{labc} 为逆变器输出电流; i_{0abc} 为本地负荷 $P_0 + jQ_0$ 的电流; i_{cabc} 为流过滤波电容 C_f 的漏电流; $P_{dg}' + jQ_{dg}'$ 、 $P_{dg} + jQ_{dg}$ 分别为逆变器输出功率和注入 PCC 的功率; $r_{eq} + jx_{eq}$ 为逆变器输出端口到 PCC 包含线路和变压器在内的等效连接阻抗。

图 1 并网逆变型分布式电源的等值单线示意图

Fig. 1 Equivalent single line diagram of parallel operation inverter-based DG

将 A 相电压相量 U_{dg} 所在方向定义为 d 轴, 各处的电压、电流可以逐级经相量运算得到, 如图 2 所示。稳态相量图给分析功率输送以及控制系统设计提供了依据。图 2 中显示正常运行时逆变器输出电压相量一般落在第一象限, 而输出电流则在第四象限, 即 d 轴电流为正, q 轴电流为负。

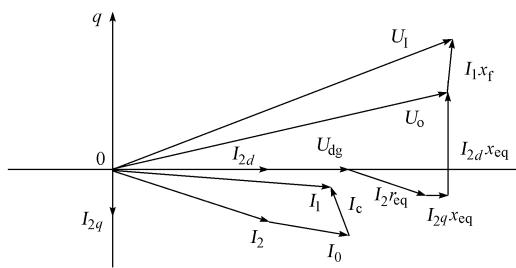


图 2 A 相稳态相量图

Fig. 2 Static phasor chart of phase A

1.2 正弦 PWM

若逆变器脉冲发生器的参考波选为正弦波, 调制波为固定频率三角波, 进行正弦 PWM(SPWM)控制, 则逆变器输出线电压基波分量的有效值 $U_{1(1)}$ (后文以 U_1 来表示) 为:

$$U_1 = k_m \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{dc} = k_{du} U_{dc} \quad (1)$$

式中: k_m 为调制因子; U_{dc} 为直流侧平均直流电压; k_{du} 为逆变电压系数。

k_{du} 以及输出电压与接入 PCC 处电压间的相位差是 SPWM 中最主要的两个控制参数。本文提出的采用电流正弦 PWM 调节的联网分布式电源电压型逆变器的综合控制器就是通过调节电压系数和相位差来实现的。采用 SPWM, 选择较高的开关频率

可以有效减少稳态低次电压谐波的污染。

1.3 电流正弦 PWM 的电压型逆变器控制

按照设定向电网输送定量的功率并保持 PCC 的电压在期望的、恰当的范围内是分布式电源逆变器运行和控制的最基本要求。分布式电源的逆变器控制往往根据本地信息进行, 参照图 1, 即根据逆变器输出三相电流 i_{labc} 、PCC 处三相电压 \mathbf{u}_{dgabc} 和三相电流 i_{2abc} 、整流侧直流电压 U_{dc} 和电流 I_{dc} 来进行, 这些信号由测量得到。

1.3.1 外环功率调节

若暂不考虑逆变器输出滤波器、变压器和线路电阻的损耗以及机端的负载, 则分布式电源向 PCC 注入的有功功率 P_{dg} 为:

$$P_{dg} = \frac{U_{dg} U_1}{x_{eq}} \sin \delta \quad (2)$$

式中: x_{eq} 为逆变器输出端口到 PCC 的等效连接电抗; $\delta = \delta_1 - \delta_{dg}$ 为逆变器输出电压与 PCC 电压的相角差。

由能量守恒原则, 分布式电源输出有功功率等于整流侧输入有功功率, 结合式(1)、式(2), 可得:

$$\frac{U_{dg} U_1}{x_{eq}} \sin \delta = \frac{U_{dg} k_{du} U_{dc}}{x_{eq}} \sin \delta = U_{dc} I_{dc,i} \quad (3)$$

即

$$I_{dc,i} = \frac{k_{du} U_{dg}}{x_{eq}} \sin \delta \quad (4)$$

式中: $I_{dc,i}$ 为流入逆变器的直流电流。

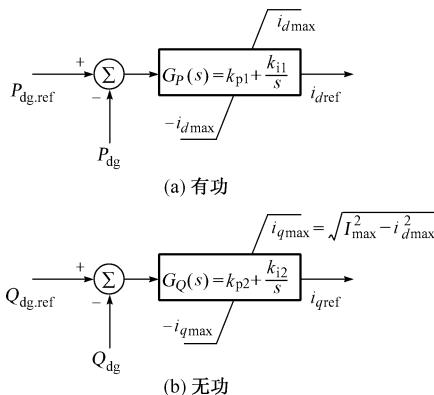
逆变器在稳态时输送的功率由等值的电流源吸收, 这一特点给本文逆变器接口控制研究提供了启发。只需对 VSI 进行电流调节就可以完成逆变器的相应功率或功率因数控制的目标。

虽然在静止 abc 坐标系下,电流调节方式速度快^[9],但逆变器开关频率不固定,输出电流中的谐波含量较高。本文采用旋转坐标系对电流的 d 轴、q 轴分量进行调节,该方式使得控制器对谐波分量不敏感。本文采用如下 dq0 坐标定义:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

同步信号取自 PCC 电压, ω 为基波角频率。

于是,根据分布式电源外特性中设定的有功、无功分别获得参考电流的 d 轴和 q 轴分量。本文采用功率反馈比例积分(PI)调节,并将其作为整个控制系统的第 1 级,其详细结构在图 3 中给出。



$P_{dg,ref}, Q_{dg,ref}$ 为有功、无功参考值; P_{dg}, Q_{dg} 为实际注入 PCC 的有功、无功; i_{dref}, i_{qref} 为 d 轴、q 轴电流参考值

图 3 第 1 级功率 PI 调节示意图

Fig. 3 First level power PI regulator block figures

在功率调节中,根据 $P_{dg,ref}, Q_{dg,ref}$ 与 P_{dg}, Q_{dg} 之差进行 PI 调节,产生 i_{dref}, i_{qref} ,作为第 2 级电流调节的输入。虽然有功、无功是分开调节的,但具体应用中无功的参考值往往是通过功率因数与有功联系在一起的。功率调节中反馈回的 PCC 点电压 u_{dgabc} 、电流 i_{2abc} 构成了第 1 个反馈控制环。

根据 PCC 点的电压、电流计算出对应的功率,视应用不同可以选用瞬时功率或平均功率参与调节。采用瞬时功率可以提高整个系统的实时性,但调节过于频繁,容易受到外界负荷波动的影响而产生轻度电压波动,甚至引发稳态电压闪变。另一方面,因为 PCC 处电压畸变会导致逆变器输出电流相应畸变,故从电能质量角度考虑,选取瞬时功率也不十分理想。相反,选取平均功率则会使分布式电源响应有所滞后,但调节过程则较为平稳。

1.3.2 内环电流调节

由第 1 级功率调节得出电流参考值后,最重要

的任务是进行电流调节。方法是参考值与实际反馈回的电流信号比较,根据差量迅速做出调节,产生正确的参考电压。若电流能及时跟踪参考电流,那么输出电压也必然能跟踪参考电压波形。研究中发现,直接采用电流 PI 调节效果并不理想,尤其是暂态情况下过渡过程较长。忽略图 1 滤波电容中流通的电流和变压器的移相作用,则逆变器输出到 PCC 时域状态方程如下所示:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + (r_{eq} + x_{eq}) \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{dga} \\ u_{dgb} \\ u_{dgc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)经坐标变换并略去零序分量,写成电压输出形式,可得:

$$\begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dgd} \\ u_{dqg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{eq} & -x_{eq} \\ x_{eq} & r_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

dq 坐标下 d 轴、q 轴电流之间有交叉项,此时只要缺少等效连接阻抗 r_{eq}, x_{eq} 等的准确参数,就无法由式(7)构成解耦前馈控制。借鉴反馈线性化解决类似问题的经验,本文对内环电流调节进行了反馈线性化设计,适当增加反馈补偿环节将原系统等效为一个解耦的一阶线性系统,即

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{eq} & 0 \\ 0 & r_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: x_1, x_2 分别为反馈补偿后新的输出。

以 d 轴为例,可等效为图 4 所示的控制框图。



图 4 反馈线性化后等效 d 轴电流调节框图

Fig. 4 Demonstration figure for d-axis current regulation after feedback linearization

经反馈线性化之后,电流调节中充分考虑了电流分量间的耦合补偿和输出电压的前馈补偿,其结构如图 5 所示。

电流调节输出 $u_{1d,ref}, u_{1q,ref}$ 分别对应正弦参考电压的 d 轴、q 轴分量,根据电压参考分量可以得出三相正弦参考波的瞬时值 u_{lref} ,与载波信号的当前时刻值比较后得到触发序列。第 2 级电流调节中逆变器输出电流构成第 2 个反馈控制环(内环)。适当选取解耦补偿系数 k_{c1}, k_{c2} ,可大大减小 d 轴、q 轴间的耦合甚至实现完全解耦。在内环电流调节中,增加的电压前馈补偿措施有效减少了多种扰动对控制的影响。在第 2 级电流调节中若电流误差为 0,逆变器输出电流根据参考值保持恒电流调节,电流的及时跟踪,保证了输出电压及时跟踪导通参考波。恒

电流调节使得输出电流更接近正弦波,无直流或零序分量;对三相负荷不平衡以及谐波不敏感,便于有功、无功控制,使分布式电源具有灵活运行的能力。

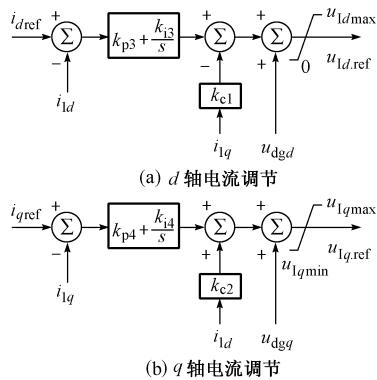


图 5 第 2 级考虑电流解耦补偿和电压前馈补偿的电流 PI 调节器

Fig. 5 Second level current PI regulator with decoupled current compensation and voltage feed-forward compensation

1.3.3 直流电压波动补偿

太阳能光伏等利用可再生能源的分布式发电系统,受自然条件限制,通常功率会随机变化。而燃气轮机或燃气发动机高速发电系统采用沿最佳转速线变工况运行,负荷变化转速设定变化,直流侧电压也随转速变化而变动。这些分布式电源的直流侧在缺少足够储能的情况下并非刚性恒定的直流源,负荷变化引起转速变化进而直流电压也随着变动。一般 VSI 控制中均没有考虑直流电压波动,这样,直流电压波动因素必须由控制器的调节作用加以规避。本文所设计的综合控制器将直流电压的波动通过前馈补偿的形式加以调节。

$$\begin{bmatrix} u_{\text{Iref},d} \\ u_{\text{Iref},q} \end{bmatrix}_{\text{new}} = \frac{U_{\text{dc},\text{ref}}}{U_{\text{dc}}} \begin{bmatrix} u_{\text{Iref},d} \\ u_{\text{Iref},q} \end{bmatrix}_{\text{old}} \quad (9)$$

如式(9)所示,由内环电流调节器获得触发电压参考波,其幅值除以直流电压标幺值得到新的参考触发电压。当前时刻直流电压的任何波动会立刻通过对应时刻的调制因子的变化体现出来,将响应延时降低到较小的水平,进而可以有效提高内环电流调节的速度。直流电压波动补偿还可以起到抑制直流电压波动对逆变器输出电压波动的作用。

1.3.4 综合控制系统

根据前 3 个小节的论述,本文针对分布式电源可控负荷的外特性,设计了电流正弦 PWM 调节的 VSI 综合控制系统,如图 6 所示。

图 6 清楚地展现了综合控制系统的结构,主体为功率、电流串级 PI 调节, d 轴、 q 轴分量分开调节,包含两个反馈环。外环第 1 级功率调节器属于稳态

调节器,是分布式电源可控负荷外特性的主调节回路,响应相对慢一点。内环第 2 级电流调节器属于暂态调节器,是副调节回路,包含了电流耦合补偿、PCC 电压前馈补偿和直流电压波动补偿,响应速度较快。内部电流反馈调节可以有效减少逆变器对开关频率变化、直流电压波动、系统电压波动、回路参数变化等干扰因素的影响,进而提高整个系统的响应速度。对反馈回的电压、电流信号也可以先进行低通滤波,消除高次谐波以及电磁噪声的不良影响,但代价是增加了控制系统响应延时。增加控制系统的调节效果往往与提高实时性相矛盾,具体应用中只能加以折中。

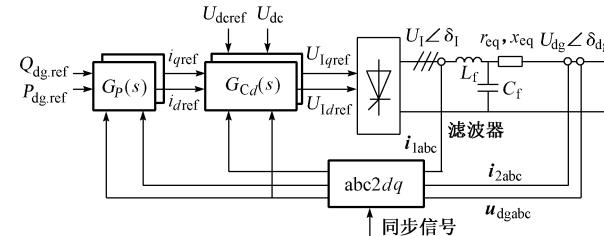


图 6 双环串级电流正弦 PWM 调节的 VSI 综合控制器

Fig. 6 VSI integrated controller with two loops series current sine PWM regulations

2 设计 LC 滤波器提高电能质量

分布式电源逆变器接口在改善分布式电源联网性能的同时,也会产生较多的谐波污染。尽管本文设计的逆变器采用了正弦 PWM,在较高的开关频率下,可以确保输出的电流中只含有较少的稳态低次谐波,但是集成配电系统中频繁复杂的波动因素迫使分布式电源的调节会比较频繁,暂态情况下谐波含量会有所增加。因逆变器的开关频率在动态过程中会有变化,在暂态过程中往往也会产生非整数次谐波——间谐波。PCC 处原有电压谐波也会通过逆变器产生对应的电流谐波,故提高逆变型分布式电源输出的电能质量水平,还需要依赖其他的措施。

图 1 中增加了 LC 滤波器,主要目的是消除围绕开关频率的高次电流谐波。滤波器中电感 L_f 和电容 C_f 参数的选择受以下条件约束^[10]:①电感引起的基波电压损耗尽可能小;②电容器中基波电流尽可能小;③电感和电容构成的串联谐振频率应尽可能远离逆变器输出电压中的低次谐波频率以及开关频率周围的高次谐波电流。此外, C_f 取值应避免与 PCC 附近的异步电动机的激励电感相作用造成自激振荡^[11]。 L_f 可以根据开关频率下谐波电流的允许幅值选择^[4], L_f 满足:

$$L_f \leq \frac{U_o(f_1)}{8\pi f_s I_1(f_s)} \quad (10)$$

式中: $U_o(f_1)$ 为基波下滤波器的输出电压幅值; $I_1(f_s)$ 为开关频率下流过滤波电抗的谐波电流。

再结合滤波器设计的经验公式:

$$10f_1 < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} < \frac{1}{10}f_s \quad (11)$$

就可以确定滤波电容的取值。

当然,在较大功率的应用中,器件的开关频率不可能较高,一般在 2 kHz 左右,式(11)较难满足,适当的折中就不可避免。此外,应尽量保证开关频率下容抗小于连接电抗^[7],即

$$\frac{1}{2\pi f_s C_f} < 2\pi f_s L_{eq} \quad (12)$$

研究中按如上要求设计出的 LC 滤波器的参数为 1 mH, 70 μF, 谐振频率约 600 Hz。仿真结果表明,可以有效滤除高次谐波电流,并抑制低次谐波电压。

3 算例

逆变器控制系统的性能主要考查稳态和暂态情况下逆变器输出(有功、无功)功率维持水平、功率因素维持水平以及电能质量水平^[11]。考查这些性能可以选择一定扰动试验来完成。这些试验包括: 分布式电源出力参考信号变动、系统电压变化、PCC 附近负荷扰动、馈线短路故障、直流侧电压波动等。

选用如图 7 所示的 5 MVA 馈线作为算例, 系统等值以及负荷数值在图中标出。 B_3 节点注入一个额定容量为 1 MVA 的逆变型接口分布式电源。该电源逆变器输出额定线电压为 1 kV, 直流侧电压为 3 kV, 逆变器开关频率为 1.5 kHz。LC 滤波器的参数为 1 mH, 70 μF, 连接到 PCC 的线路参数为 0.1 Ω, 1 mH。在 MATLAB 中仿真采用的时间步长为 50 μs。

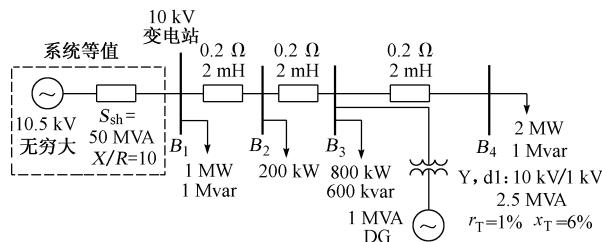


图 7 4 节点馈线算例的单线示意

Fig. 7 Single line figure of four-node feeder

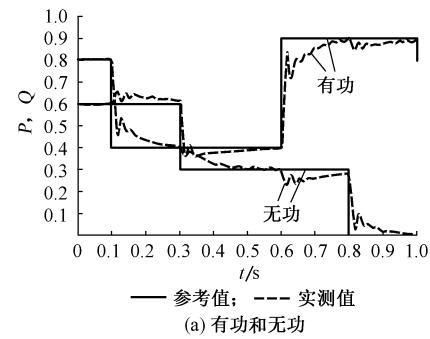
分布式电源接口控制系统中的参数如表 1 所示。

给定的外特性功率参考信号在 1 s 内连续发生

2 次阶跃, 分布式电源外特性的跟踪保持曲线如图 8(a)所示。因本文设计的综合控制器中有功出力、无功出力可以相对独立调节, 故有功、无功阶跃时间相错开, 从响应曲线可以观察出两者间的影响。

表 1 逆变器综合控制系统中有关参数的取值
Table 1 Parameters of inverter integrated control system

k_{p1}	k_{il}	i_{dmax}	i_{dmin}	k_{p2}	k_{i2}	i_{qmax}	k_{p3}	k_{i3}
0.5	20	1.0	-1.0	0.5	20	1.0	0.8	10
k_{cl}	u_{ldmax}	u_{ldmin}	i_{qmin}	k_{p4}	k_{i4}	k_{c2}	u_{lqmax}	u_{lqmin}
0.2	1.0	-1.0	-1.0	0.8	10	0.2	1.0	-1.0



(a) 有功和无功

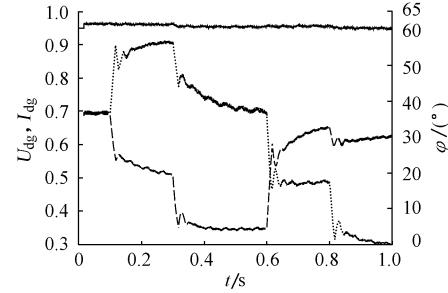


图 8 功率跟随以及 PCC 电压、电流和功率因数角
Fig. 8 Curves of power tracing, voltage, current and power angle at PCC

从图 8(a)可以看出, 有功在 0.1 s 从 0.8 跳跃到 0.4, 0.8 s 时再阶跃到 0.9, 无功在 0.3 s 从 0.6 阶跃到 0.3, 于 0.8 s 阶跃到 0。采用本文设计的接口综合控制器, 有功、无功均能在较短的时间(约 0.2 s)内跟随外特性变化的要求, 具备良好的维持功率能力。在选取的控制器参数下, 阶跃调节中上升时间短且没有出现超调。因无功出力不断减小, 如 8(b)所示, PCC 电压呈少许降低态势。注入电流的幅值、功率因数角则分别跟随总出力和功率因数迅速变动。调节维持好功率注入也保证了功率因数的保持能力。因动态过程中, PCC 注入系统的功率有轻微衰减振荡, 使得 PCC 电压有轻微波动。该分布式电源很好地跟随分布式电源可行运行范围内功率的变化, 这说明本文所设计的电流正弦 PWM 串级 PI 外特性控制器是完全可行的, 分布式电源可以

实现可控负荷的恒功率电压源特性。

外特性跟随过程中,虽然有功、无功调节可以相对独立进行,但调节过程中两者之间不可避免地存在干扰。在有功(无功)进行正(负)方向调节时,无功(有功)会有少许负(正)方向的波动,这可从图9所示的内环电流调节模块输入信号的响应曲线中清楚地观察出。

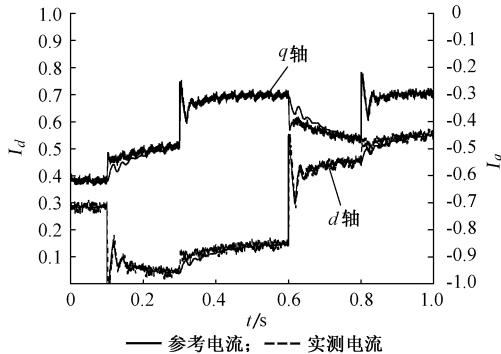


图9 内环d轴、q轴电流调节信号的跟随曲线

Fig. 9 Tracing curves of inner loop d and q axis current regulations

因为内环调节速度明显高于外环,基本实现了恒电流调节,及时跟踪电流的变化,并确保电压能跟随导通参考波变化。在此双反馈串级PI调节的系统结构中,有功、无功功率调节之间存在细微的相互影响,但这并不妨碍分布式电源外特性的稳态表现。

另一方面再考虑电能质量输出水平。恒电流调节环节产生的正弦PWM导通参考波基本接近正弦,如图10显示的A相一小段的参考波。

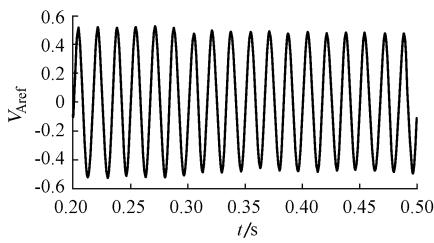


图10 逆变器A相导通参考波

Fig. 10 Inverter reference signal curve of phase A

理论上,逆变器输出的电流中的谐波含量不高。但因 B_2 节点有整流性污染负荷,使得逆变器输出的电流中含有约10%的高频谐波,如图11所示。经过LC滤波器滤波后注入PCC点的电流谐波则降低为4.23%,可达到国家行业标准相关规定的要求。

本文所提的分布式电源可控负荷的外特性综合控制系统具有较低的谐波注入。高电能质量的逆变器控制器大大增强了逆变型分布式电源的应用性能。

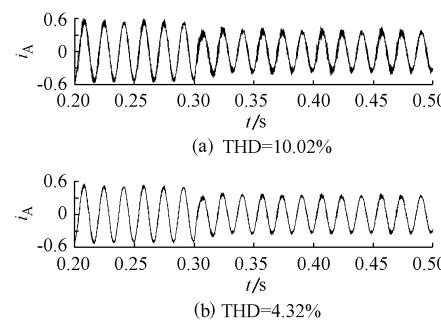


图11 逆变器输出电流以及注入PCC电流波形比较

Fig. 11 Current curves comparison between inverter outputs and injected into PCC

4 结语

本文设计了采用电流正弦PWM调节方法的联网分布式电源电压型逆变器的综合控制器,能够较好地保持并网分布式电源可控负荷的外特性。该控制器的核心采用含有直流电压波动前馈补偿的串级双环PI控制结构。控制系统设计灵活,响应迅速,具有较低的谐波注入,有效增强了分布式电源的应用范围。

参 考 文 献

- 1 刘文华,宋强,严干贵,等(Liu Wenhua, Song Qiang, Yan Gangui, et al).采用IGCT电压型三电平逆变器的高压变频调速器(Medium Voltage Drive with NPC Three-level Inverter Using IGCT).电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(20):61~66
- 2 Naik R, Mohan N, Rogers M. A Novel Grid Interface, Optimized for Utility-scale Applications of Photovoltaic, Wind-electric, and Fuel Cell Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1920~1926
- 3 Chen Z, Spooner E. Grid Interface Options for Variable-speed, Permanent-magnet generators. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 1998, 145(4): 273~283
- 4 Prodanovic M, Green T C. Control and Filter Design of Three-phase Inverters for High Power Quality Grid Connection. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(1): 373~380
- 5 Liang J, Green T C, Weiss G. Evaluation of Repetitive Control for Power Quality Improvement. In: Proceedings of IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol 4. Piscataway (NJ): IEEE Service Center, 2002. 1803~1808
- 6 龙英文,赵光宙(Long Yingwen, Zhao Guangzhou).最少拍控制在串联回路调节器的应用(Series-wound Active Power Line Conditioner with Dead Beat Control).电力系统及其自动化学报(Proceedings of the Electric Power System Automation),2003, 15(2): 34~36
- 7 Prodanovic M, Green T C. Control of Power Quality in Inverter-based Distributed Generation. In: Proceedings of IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Vol 2. Piscataway (NJ): IEEE Operations Center, 2002. 1185~1190

(下转第70页 continued on page 70)

(上接第 66 页 continued from page 66)

- 8 Schiemenz I, Stiebler M. Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in a Variable Speed Wind Energy System. In: Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Vol 2. Piscataway (NJ): IEEE Operations Center, 2001. 872~877
- 9 Hatzidioniu C J, Nikolov E N, Pourboghrat F. Power Conditioner Control and Protection for Distributed Generators and Storage. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(1): 83~90
- 10 Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Design and Analysis of the Inverter-side Filter Used in the Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(3): 857~864
- 11 Kazmierkowski M P, Malesani L. Current Control Techniques for Three-phase Voltage-source PWM Converters: A Survey.

IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 691~713

王志群(1976—),男,博士研究生,主要从事电能质量评估和分布式发电的研究。E-mail: wzq99@mails.tsinghua.edu.cn

朱守真(1950—),女,研究员,主要从事电力系统建模、参数辨识、大型发电机组安全监控、电压稳定、电能质量监控和评估的研究。E-mail: zsz@mail.tsinghua.edu.cn

周双喜(1941—),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统分析和控制以及电压稳定的研究。E-mail: zsx-dea@mail.tsinghua.edu.cn

CONTROLLER DESIGN FOR INVERTER-BASED DISTRIBUTED GENERATION

Wang Zhiquan, Zhu Shouzhen, Zhou Shuangxi

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: How to control parallel operating distributed generation (DG) is one of the issues in application. Based on the proposed controllable quasi-load external characteristic of DG, an integrated control system is designed which adopts current sine-PWM regulation for voltage source inverter (VSI) of interconnected DG. The core of the controller is the infrastructure of double feedback loop and series PI regulators with DC voltage variation feed-forward compensation. The outer loop is power regulators, and the voltage and the current at the PCC are feed-backed. Active and reactive power can be regulated separately. The inner loop is current regulators that have rapid response with decoupled components compensator and the current at the inverter terminal is feed-backed. DC voltage feed-forward compensation may reduce the negative effect due to the lack of storage at the DC side. The output filter can further improve power quality. Simulation results show that the designed control system can properly maintain the constant power voltage source external characteristics of DG. The proposed design is flexible and a low harmonics penetration is obtained.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277021) and SCITECH Plan Project of Beijing Municipal Science & Technology Commission (No. H030630010510).

Key words: distributed generation; voltage source inverter (VSI) control; constant power voltage source; double feedback and series PI regulation