

基于 PQ 控制方法的微电网并网运行

摘要:

0 引言

随着环境问题和能源问题的日益突出,世界各国开始纷纷为寻求更加环保节能的新能源发电方式而努力。近年来,具有环境污染少、能源利用率高及安装地点灵活等优点的分布式发电开始受到世界各国的关注,然而,随着分布式发电的迅速发展及其在大电网中的大量接入,其对大电网的影响也是显而易见的因此,急需另外一种发电方式来解决以上问题,随着新型技术的应用,特别是现代控制理论及电力电子技术的发展,本世纪初微电网的概念被提出。

微电网中的大多数微电源通过逆变器接入系统,因此对微电源的控制即为其逆变器的控制。无论是并网运行还是独立运行,都需要对微电网内的各个逆变器进行有效地控制,以维持电压和频率在允许变化的范围之内,从而满足负荷对电能质量的要求。PQ 控制一般用于发电具有间歇性的微电源,如光伏发电、风力发电等,并用于并网发电,此时微电网的电压由大电网或其他微电源提供稳定支撑时,则此微电源逆变器控制的主要目标就是保证逆变器输出的有功电流和无功电流跟踪参考电流以及电流的频率和相位与微电网电压保持一致。

1 微电网的结构

微电网将分布式电源、负荷、储能装置、控制装置等汇集而成一个小型发配电系统,是一个能够实现自我控制和管理的自治系统,图 1-1 给出了一种典型的微电网系统示意图。

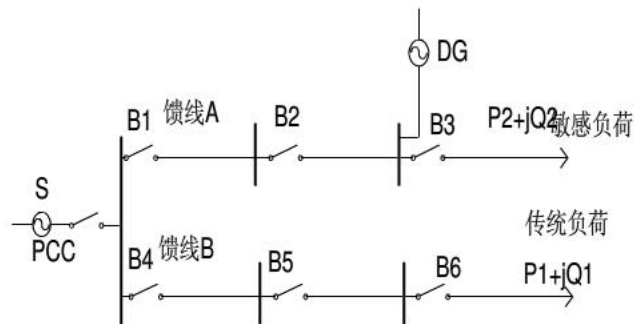


图 1-1 典型的微电网系统

图 1-1 中微电网通过公共耦合点 (Point of Common Coupling, PCC) 处的静态开关 (Static Transfer Switch, STS) 与配电网相连,整体呈辐射状结构,共有 2 条馈线 A、B。重要或敏感负荷接在馈线 A 上,不重要的负荷接在馈线 B 上。这样,当微电网与主网解列时,可以切去不重要的负荷,保证网内重要负荷和发电平衡。另外,微电网中还配置有潮流控制器和能量管理等控制设备,帮助实现微电网有效的控制和管理。当负荷发生变化时,潮流

控制器可根据本地电压频率信息对潮流进行调节，控制分布式电源输出的功率；而能量管理器则可以综合地解决微电网在进行电压和潮流控制以及解列操作时出现的功率分配、稳定运行等一系列运行问题，保证微电网内的功率平衡。

2 微电源的控制方法

微电网存在两种典型的运行模式：正常情况下微电网与大电网并联运行，称为并网模式；当检测到电网故障或者电能质量不满足要求时，微电网将及时的与大电网断开而独立运行，称为孤岛模式。并网运行时，由大电网提供参考电压和参考频率；独立运行时，则要求微电网内至少有一个微电源能建立稳定的电压和频率，并且使之处于允许的范围之内。

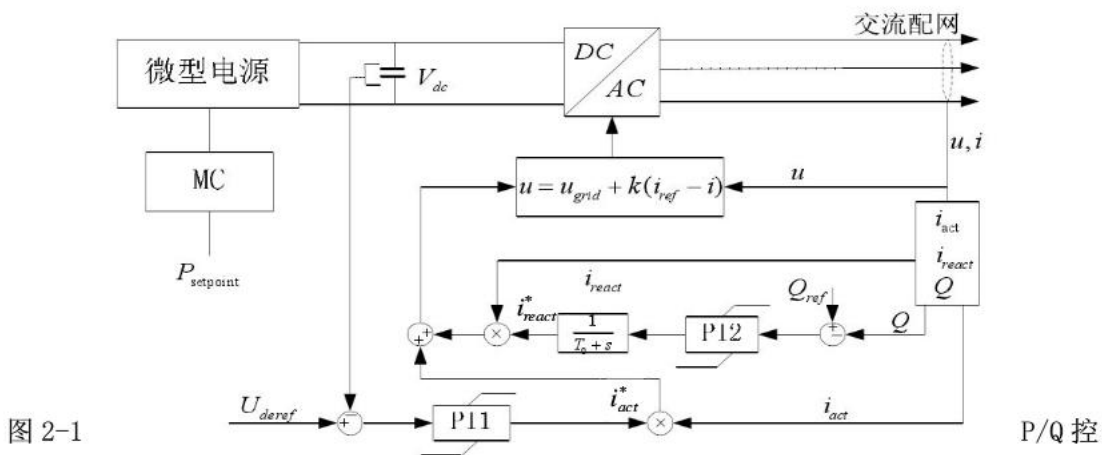
微电网中的大多数微电源通过逆变器接入系统，因此对微电源的控制即为对其逆变器的控制。无论是并网运行还是独立运行，都需要对微电网内的各个逆变器进行有效地控制，以维持电压和频率在允许变化的范围之内，从而满足负荷对电能质量的要求。尤其是微电网在独立运行模式下，由于微电源不再利用并联运行的常规大电网获得电压和频率参考，此时的控制将更加复杂。微电源逆变器的控制方式有 V/f 控制和 PQ 控制两种，V/f 控制方法使微电源输出的电压和频率在允许变化的范围之内，而 PQ 控制方法使微电源输出恒定的有功和无功功率。

2.1 PQ 控制

通常 P/Q 控制方式用于微电网并网运行状态，在该状态下，微电网内负荷波动、频率和电压扰动由大电网承担，各 DG 不参与电压和频率的调节，直接采用大电网提供电压和频率作为支撑。采用电力电子逆变器的分布式电源的 P/Q 控制方式主要有两种。

方法一通过设定的微型电源原动机的有功参考值来进行有功功率调节，并通过直流电压控制器参与辅助调节，而无功按照参考值进行控制。

逆变器 P/Q 控制方式一框图如图 2-1 所示。



制方式一框图

在该 P/Q 控制方式下，有功控制和无功控制对象不同。有功控制通过分布式电源控制器与逆变器直流电压控制器共同完成。首先给定原动机功率参考值 $P_{SetPoint}$ ，之后在原动机自身功率调节器作用下按参考值进行有功功率输出，同时在逆变器直流侧的电压控制器 PI1 作用下，保障直流电压恒定，从而实现 DG 有功功率输出。无功功率控制主要通过逆变器进行。首先对逆变器右侧的端口电流 i 和电压 u 信号进行测量及计算，得出无功输出 Q 。然后在调节器 PI2 的作用下，根据无功功率参考值 Q_{ref} 与实测的逆变器输出无功 Q 之间的经过差值调节器来控制无功电流的幅值，从而实现恒定无功调节。

方法二是指通过直接控制逆变器实现 P/Q 控制。在该控制下，通过选择合理的同步旋转轴在 Park 变换将逆变器输出电压 abc 分量转化为 dq0 分量，此时 q 轴电压分量为 0， $u_{eq}=0$ ，逆变器的输出功率用下式表示为

$$\begin{cases} P_{ref} = u_{gd} \times i_{gd} + u_{gq} \times i_{gq} = u_{gd} \times i_{gd} \\ Q_{ref} = -u_{gd} \times i_{gq} + u_{gq} \times i_{gd} = -u_{gd} \times i_{gq} \end{cases}$$

由上式得电流内环的 dq 轴参考值为

$$\begin{cases} i_{gd,ref} = P_{ref} / u_{gd} \\ i_{gq,ref} = -Q_{ref} / u_{gd} \end{cases}$$

dq 轴电流实际测量值 i_{gd} 、 i_{gq} 与电流参考值 $i_{gd,ref}$ 、 $i_{gq,ref}$ 之间的差值通过 PI 调节器作用后，可为逆变器电压输出参考值 $u_{id,ref1}$ 、 $u_{iq,ref1}$ ，经滤波后，由其控制逆变器 dq 轴电压参考分量值 $u_{id,ref}$ 和 $u_{iq,ref}$ ，之后通过 Park 反变换将其转化为 abc 分量进而对逆变器进行控制。

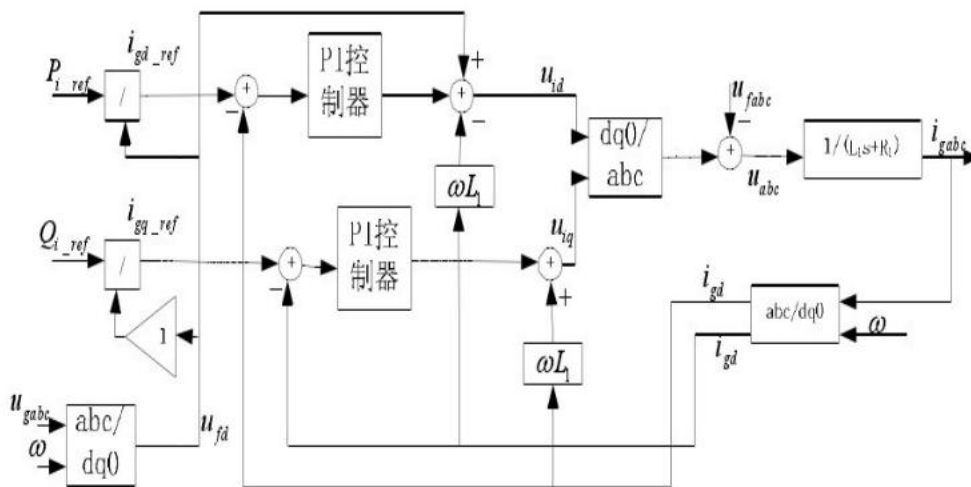


图 2-2 P/Q 控制方式二框图

2.2 微电源逆变器数学模型分析

在介绍微电源逆变器的控制方法之前,首先要进行微电源逆变器数学模型的建立,本文选择介绍三相电压型桥式逆变器,并假设其直流侧为恒定直流源。三相逆变器主电路拓扑结构如图 2-3 所示,直流侧电压 V_{dc} 经过三相逆变器后转换为三相交流电,再经 LC 滤波器滤除高次谐波,得到工频正弦交流电,给负荷供电且剩余电能还可输出给微电网。

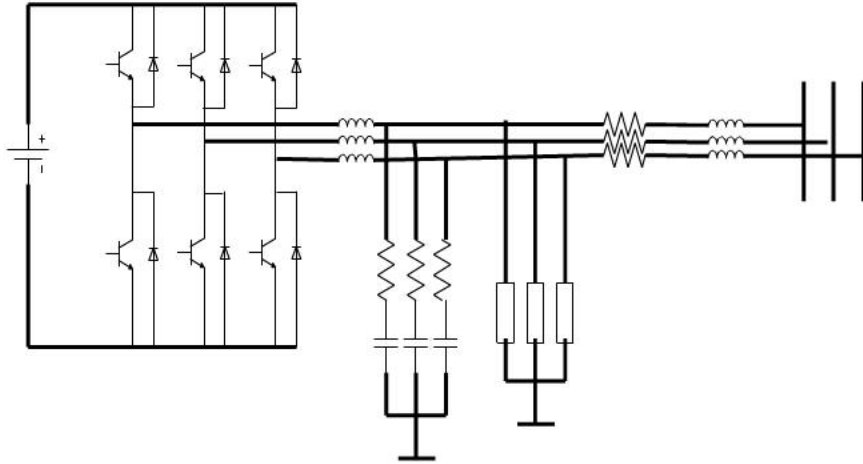


图 2-3 三相逆变器主电路拓扑结构

其中, L_1 、 C_1 、 R_1 为滤波电感、滤波电容、滤波电阻,因 R_1 一般较小,在数学建模时可以忽略不计, Z_2 为负载参数, L_3 、 R_3 为输出线路参数, u_{1a} 、 u_{1b} 、 u_{1c} 为逆变器的输出电压, u_{2a} 、 u_{2b} 、 u_{2c} 为负载电压, i_{1a} 、 i_{1b} 、 i_{1c} 为滤波电感 L_1 上的电流, i_{2a} 、 i_{2b} 、 i_{2c} 为滤波电容上的电流, i_{3a} 、 i_{3b} 、 i_{3c} 为负载电流和电网电流之和。

从上图中可以看出,逆变器直流侧电源电压用直流电代替。该并网逆变器为电压型三相桥式逆变器,主要由 DC/AC 逆变电路和输出滤波电路两部分组成。

DC/AC 逆变电路由 3 个半桥组成, 关管全部采用全控型器件, 如 GTO、IGBT、GTR 等, D1-D6 为续流二极管。当对波形要求较高时, 则一般采用 PWM 调制方法, 以抑制高次谐波。根据各开关管导通时间的长短, 该电路可分为 180° 导电型和 120° 导电型。在 180° 导电型中, 每个开关管的驱动信号持续 180° , 同一相上下两个开关管交替导通, 任何时刻都有 3 个开关管导通, 在一个周期内, 6 个 关管触发导通的次序为 T1-T6, 依次相隔 60° 。在 120° 导电型中, 同一相上两臂的导通间隔为 60° , 各相依次相差 120° 。在同样直流电压时, 180° 导电的逆变电压比 120° 的高, 故 180° 导电时开关管的利用率较高, 因此 180° 导电型较为常用。因此本文采取 180° 导电型的 PWM 调制方法, 使直流电能转换为交流电能, 得到与微电网同频同相的正弦交流电并与微电网连接。

输出滤波电路部分是为了抑制由于开关管动作产生的高次谐波,使逆变器输出电流与微电网电压同频同相。常见的滤波电路主要有三种:L型、LC型和LCL型。其中,L型结构最为简单,并网控制也较为容易,但其高频滤波性能较差,如果要滤除高频谐波,则需要很高的开关频率,且滤波效果很大程度上会依赖控制器的性能;LCL型滤波结构虽然对高频谐波具有很好的衰减特性,但其控制策略及滤波参数的设计会比较复杂,并且因为是一个三阶的结构,较容易引起系统振荡。LC型滤波结构并网控制简单,对高频谐波有很好的抑制作用,且能够实现孤岛运行模式和并网运行模式的相互切换,因此,本文选择LC型滤波结构。

根据图 2-3 可列出如下方程:

滤波电感 L_1 的电压方程为

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = u_1 - u_2$$

滤波电容 C_1 上的电流方程为

$$C_1 \frac{du_2}{dt} = i_1 - i_3$$

其中, i_1 , i_3 , u_1 , u_2 分别为电流矢量和电压矢量,且

$$i_1 = \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{pmatrix} \quad i_3 = \begin{pmatrix} i_{3a} \\ i_{3b} \\ i_{3c} \end{pmatrix} \quad u_1 = \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{pmatrix} \quad u_2 = \begin{pmatrix} u_{2a} \\ u_{2b} \\ u_{2c} \end{pmatrix}$$

$$L_1 = \begin{pmatrix} \frac{di_{1a}}{dt} \\ \frac{di_{1b}}{dt} \\ \frac{di_{1c}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_{2a} \\ u_{2b} \\ u_{2c} \end{pmatrix}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} \frac{du_{2a}}{dt} \\ \frac{du_{2b}}{dt} \\ \frac{du_{2c}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i_{3a} \\ i_{3b} \\ i_{3c} \end{pmatrix}$$

这两个公式是三相逆变器在三相静止坐标系(a,b,c)下的数学模型,此模型具有物理意义清晰、直观易懂等优点,但由于交流量全为时变量,因此不易于控制系统的设计,为了便于控制系统的设计,一般要将三相静止坐标系(a,b,c)下的数学模型转换成与微电网基波频率同步旋

转的(d,q)坐标系下的数学模型。

3. 微电源逆变器控制系统设计

3.1 PQ 计算

在这个控制模块里, 首先采集负载上的电压 u_{2i} 与逆变器的输出电流 i_{1i} ($i=a, b, c$), 然后按照下式计算逆变电源的输出功率

$$P = u_{2a}i_{1a} + u_{2b}i_{1b} + u_{2c}i_{1c} \quad (3-1)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_{2b} - u_{2c}) i_{1a} + (u_{2c} - u_{2a}) i_{1b} + (u_{2a} - u_{2b}) i_{1c}] \quad (3-2)$$

各逆变电源实时测量电压和电流, 计算所得的功率作为 P-f、Q-U 下垂特性控制模块的输入信号, 为各逆变电源之间的功率合理分配提供了良好的依据。

3.2 PQ 控制系统设计

PQ 控制方式适用于微电网与大电网并网运行的情况, 此时, 逆变器的输出电压由大电网决定, 而只要通过调节逆变器的输出电流就能控制微电源的输出功率。因此, 只需要设计一个电流调节器来控制逆变器输出的有功电流和无功电流。

在三相静止坐标系 (a, b, c) 中, 逆变器输出功率的表达式为 (3-1) 与 (3-2), 将其转化为两相旋转坐标系 (d, q) 中的功率表达式

$$P = u_{2d}i_d + u_{2q}i_q \quad (3-3)$$

$$Q = u_{2q}i_d - u_{2d}i_q \quad (3-4)$$

假设两相旋转坐标系 (d, q) 的 d 轴与负载电压矢量 u_{2dq} 重合, 则负载电压矢量的 q 轴分量 $u_{2q}=0$, 此时, 式 (3-3) 和式 (3-4) 简化为

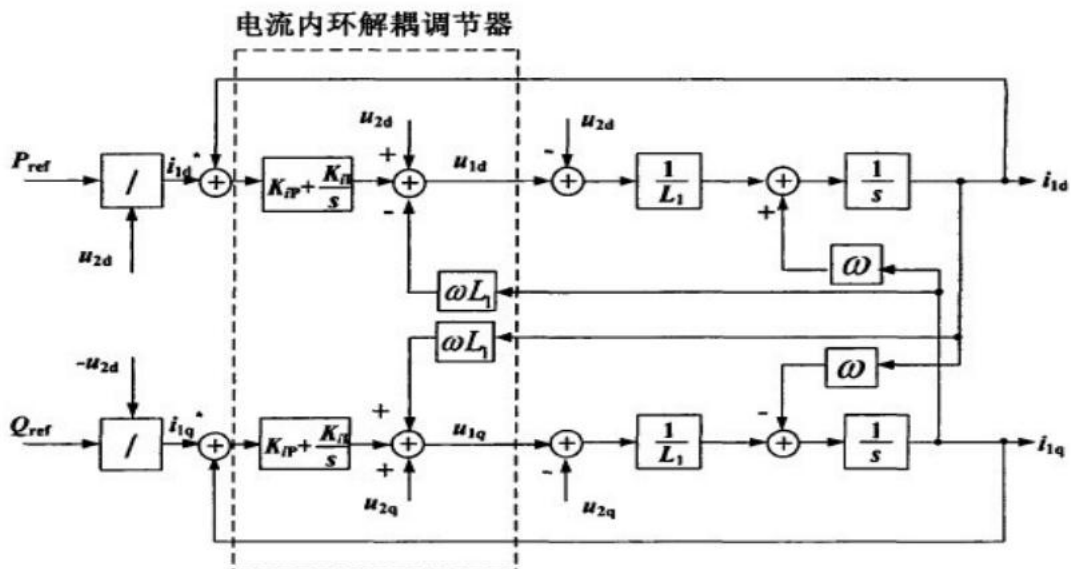
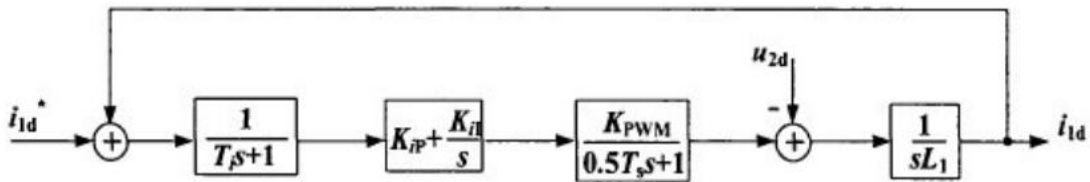


图 3-1 PQ 控制系统中的解耦控制示意图

$$P = u_{2d} i_{1d} \quad (3-5)$$

$$Q = -u_{2d} i_{1q}$$

式 (3-5) 和式 (3-6) 中的 u_{2d} 是恒定的, 因此, 通过控制 i_{1d} 和 i_{1q} 就能调节逆变器有功功率和无功功率的输出, 即 PQ 控制策略只需要设计输出电流的单闭环反馈就能实现。电流环的主要目的是实现对功率“稳”和“准”的控制, 故采用 PI 调节器。在进行电流调节器设计时, 需要对 d、q 轴的分量进行解耦, 具体的控制原理图如图 3-1 所示。对图 3-1 中的 d 轴分量进



行简化得到图 3-2。

图 3-2 d 轴分量简化图

4 基于 Matlab/Simulink 的微电网模型

4.1 主电路模型

本文在 MATLAB/Simulink 环境下建立模型, 主电路分析模型如图 4-1 所示

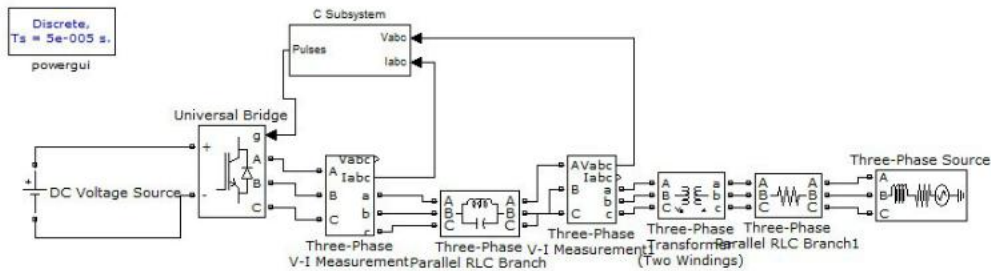


图 4-1 基于 PQ 控制方法的微电网并网主电路模型

此模型包括两大部分: 主电路部分和控制部分。主电路包括直流侧电压源、电压型三相桥式逆变器、滤波器、负载和 380V 微电网。控制部分包括输入电压电流坐标变换、软件锁相环、电流控制环和 SPWM 调制。

4.2 控制部分仿真模型

电压电流由三相静止坐标 (a, b, c) 到两相旋转坐标 (d, q) 变换和软件锁相环的仿真模型如图 4-2 所示。

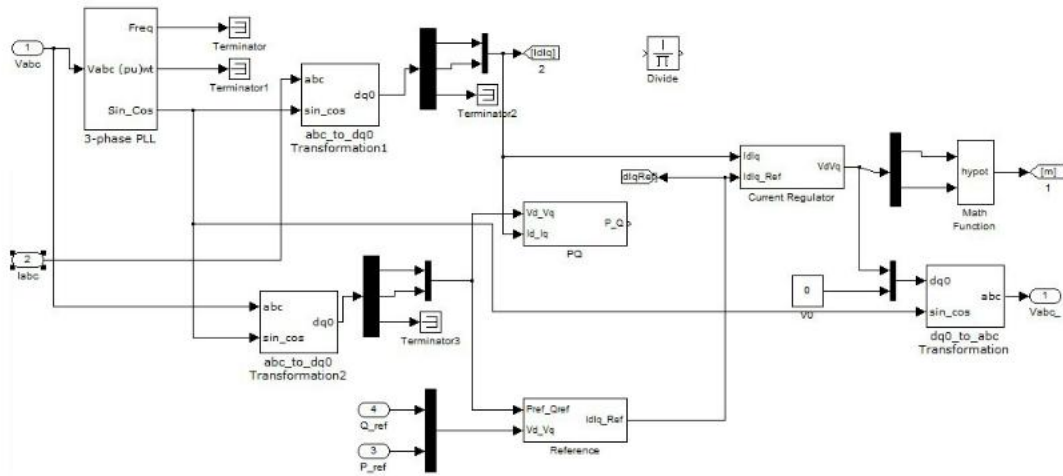


图 4-2 锁相环和 dq 坐标变换仿真模型

4.3 PQ 计算模型

根据式 (3-3)、(3-4) 可构建模型, 如图 4-3 所示

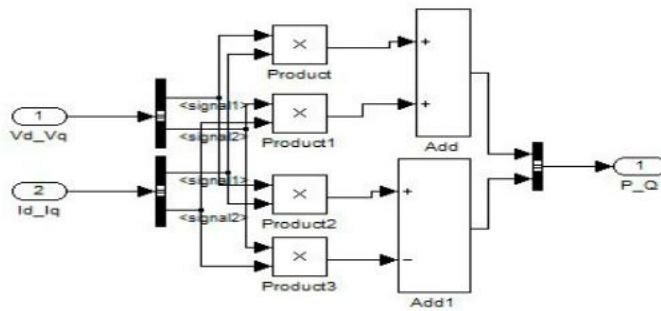


图 4-3 PQ 计算模型

4.4 微电网动态仿真分析

仿真模型的参数设置如下:

负荷 A_2 参数: $P_2=14.5\text{KW}$, $Q_2=0.9\text{kvar}$;

调节器参数: $K_{IP}=0.02$, $K_{II}=43$ (电流调节器);

微电源参数: $P_{ref}=14\text{kW}$, $Q_{ref}=-48\text{kvar}$;

系统额定输出: $U_n=220\text{v}$ (有效值), $f_n=50\text{Hz}$ 。

单个微电源带负荷与大电网并网运行, 微电源逆变器采用 PQ 控制方式, $t=2\text{s}$ 时突加阻性负荷 Z_{B2} ($P_{B2}=3.5\text{kW}$), $t=3\text{s}$ 时又将该负荷切掉, 仿真结果如图 4-4 所示。由图 4-4(a) 可知, 由于微电源与大电网并联运行, 系统的频率和电压支撑由大电网提供, 因此当负荷的有功功率发生变化时, 负荷的电压频率在经历了一定的暂态过程之后, 又恢复到了 50Hz ; 微电源逆变器的控制方式为 PQ 控制, 所以当给定的功率输出指令不变时, 微电源的输出功率不变, 负荷增加的

有功功率由大电网提供,如图 4-4(c)所示。而负荷的电压幅值在功率变化过程中也经历了一定暂态,然后恢复到额定值,如图 4-4(b)。

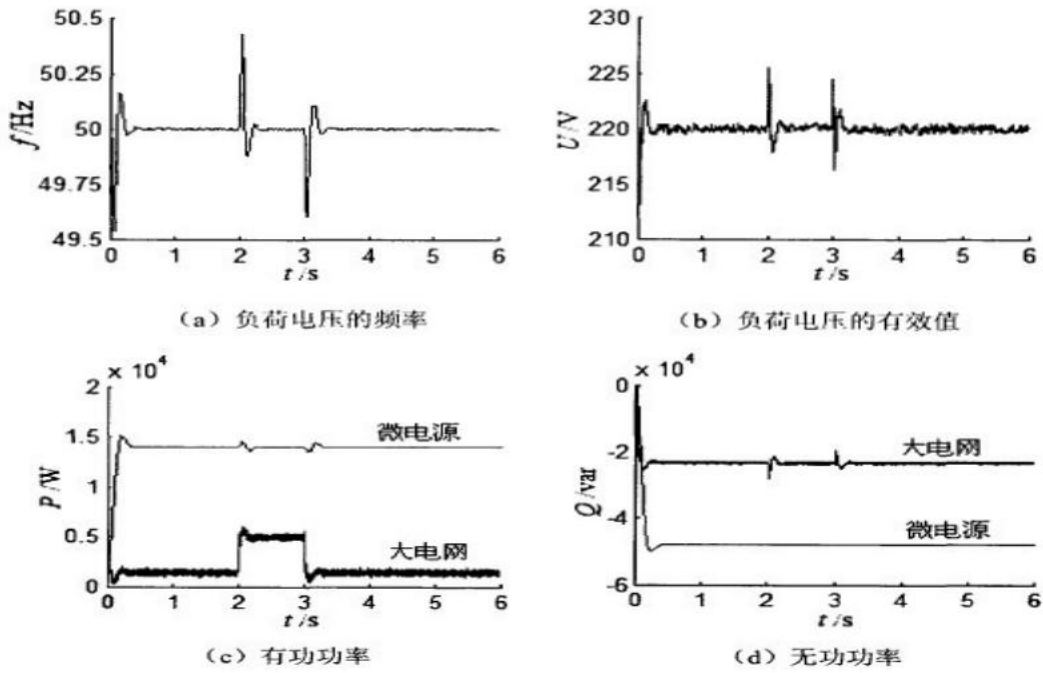


图 4-4 单个微电源与大电网并网运行时,负荷有功功率发生变化的仿真结果

图 4-5 是针对单个微电源与大电网并网运行时,负荷的无功功率发生变化的仿真结果, $t=2\text{s}$ 时突加感性负荷 Z_{c2} ($Q_{zc2}=2\text{kvar}$), 大电网输出的无功功率从 -23.2kvar 增加到 -21.2kvar , 微电源输出的无功功率保持不变, $t=3\text{s}$ 时又将该负荷切掉, 所以无功功率又恢复到原来的输出值, 而负荷的电压幅值和频率都能满足电能质量的要求。

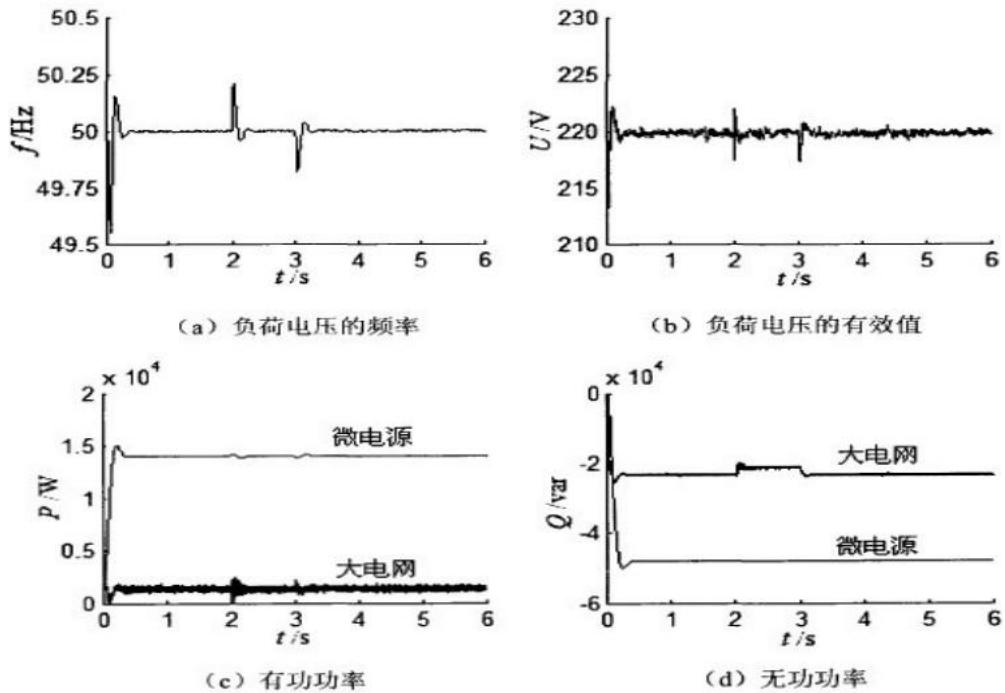


图 4-5 单个微电源与大电网并网运行时, 负荷无功功率发生变化的仿真结果

5 结语

本文建立了三相逆变器在两相旋转坐标系下的数学模型, 基于这一数学模型, 深入分析了 PQ 控制的基本原理, 并对 PQ 控制器进行设计。在 Matlab/Simulink 中建立微电源并网运行的仿真模型, 并对有功和无功功率发生变化这两种情况, 进行仿真分析系统的动态特性, 验证了仿真模型的正确性。

参考文献:

- [1]鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-105.
- [2]盛鹁, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81.
- [3]杨素萍, 赵永亮, 奕凤奎, 等. 分布式发电技术及其在国外的的发展状况[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(2): 57-6
- [4]张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 中国电力出版社, 2010.
- [5]严陆光, 夏训诚, 周凤起, 等. 我国大规模可再生能源基地与技术的发展研究[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(1): 13-25
- [6]李富生, 李瑞生, 周逢权. 微电网技术及工程应用[M]. 中国电力出版社, 2013.
- [7]何宣虎. 含移动储能单元的微网控制的研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [8]光伏并网逆变系统综合控制策略研究及实现[D]. 清华大学, 2006.
- [9]王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- [10]李鲁霞. 多源微电网综合控制策略及其仿真研究[硕士学位论文]. 浙江工业大学, 2013.
- [11]吕婷婷. 微电源控制方法与微电网暂态特性研究[硕士学位论文]. 山东大学, 2010.

