

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.016

微电网电压稳定控制策略研究

艾 欣, LE Kim Anh, DANG Ngoc Huy

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:针对微电网中的分布式电源自身的不稳定性将导致微电网电压不稳定的问题,给出了一种交直流混联结构微电网的典型系统,建立了双向 AC/DC 变流器(整流模式和逆变模式)、分布式电源逆变器及其控制系统的数学模型,提出了一种新型的双向 AC/DC 变流器控制方法,根据微电网的电压与功率关系,设计了一种基于电压外环、电流内环和功率环等的反馈控制器,并给出了相应的下垂控制策略。通过理论分析分布式电源的功率、电压特性及其对微电网电压稳定性的影响,提出了能够有效抑制分布式电源功率波动、提高微电网电压质量的控制策略。研究结果表明,该双向 AC/DC 变流器能稳定地控制微电网电压,具有很好的稳态性。

关键词:分布式电源;微电网;电压稳定;双向 AC/DC 变流器;控制策略

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0082-07

Study on voltage stability control strategy of microgrid

AI Xin, LE Kim Anh, DANG Ngoc Huy

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at solving the voltage instability of microgrid caused by the instability of the distribution generation in the microgrid, a typical system of AC/DC hybrid structure microgrid was provided. The bidirectional AC/DC converter (rectifier and inverter models) and the mathematical model of distribution generation inverter and its control system were also established. From that, a new-type of bidirectional AC/DC converter control method was proposed. According to the micro grid voltage and power relationships, a feedback controller was designed based on voltage outer loop, current inner loop and power loop etc, and the corresponding droop control strategy was provided as well. The power and voltage characteristic of distribution generations (DGs) and their effects on voltage stability of the microgrid were analyzed theoretically to propose the effective control strategy of controlling the power fluctuation of DGs, improving the power quality of the microgrid. The results indicate that the bidirectional AC/DC converter can stably control the microgrid voltage, which has a fine steady state.

Key words: distributed generation(DG); microgrid; voltage stability; AC/DC bidirectional converter; control strategy

0 引 言

研究含有分布式电源的微电网接入主电网具有很强的现实意义。微电网是由分布式电源、储能装置、能量变换装置、负荷、保护装置集中而成的小型电力系统^[1]。其中,分布式电源技术一般指以新能源与可再生能源为主的小型发电装置,就近布置在负荷附近的发电方式,发电容量为几十到几百千瓦的燃料电池、微型燃气轮机或者柴油发电、太阳能光伏发电技术、风力发电技术及迅速发展的超导储能技术等^[2-3]。微电网

有两种基本运行模式:并网运行和孤岛运行。不管是并网运行或者是孤岛运行,都需要对各自子单元进行有效的质量控制,其输出电压的频率和幅值在一定范围内,电能质量到达标准^[4]。微电网中的分布式电源通过电力电子设备接入配电系统,其主要设备为逆变器,其控制策略可分成 PQ 控制、V/f 控制和下垂控制(Droop 控制)^[5]。对于输出功率随机的电源,一般采用 PQ 控制,可以达到最大的能源利用率。对于功率可以调节的电源,控制比较容易,可以实现 V/f 的控制,可用于保证微电网频率和电压的稳定性。在低压

收稿日期:2014-09-04

作者简介:艾 欣(1964-),男,北京人,博士,教授,博士生导师,主要从事微电网、电动汽车充电站及调度方面的研究。E-mail: aixin@ncepu.edu.cn

微电网系统中,传统 Droop 控制由于受到线路阻抗的影响,难以实现有功功率和无功功率的分配^[6],这会引起电压调节存在一些不协调的问题,主要表现为分布式电源输出电压幅值存在差异。文献[7]主要研究了通过控制器参数设计使得分布式电源之间输出阻抗呈分布式电源额定容量的反比,以实现有功功率和无功功率的分配,但是受到线路实际阻抗的影响,该方法难以精确实现。在微电网并网运行时,通过公共连接点和电网相连,电网电压幅值、频率的测量精度直接影响逆变器输出的交换功率。不管微电网线路呈阻性或者是感性,或者分散控制策略还是主从控制策略,都是利用控制功率的双向流动来达到稳定的电压^[8]。因此,变换器需具备逆变(DC/AC)与整流(AC/DC)双重功能,可以称为双向变流器,是微电网系统中电压稳定的关键。

针对以上问题,根据运行不同系统的分布式电源,本研究提出一种适用于微电网的双向 AC/DC 变流器结构和控制策略。

1 交直流混合微电网的结构

交直流混合微电网系统的结构如图 1 所示。图 1 中,主要包括交流母线、直流母线、双向 AC/DC 变流器、储能装置、交流负荷、直流负荷和分布式电源构成^[9],包括风力发电、光伏发电、蓄电池、燃料电池、微型燃气轮机等。在微电网并网运行时,交流分布式电源和直流分布式电源都按照调度指令,双向 AC/DC 变流器对电网电压幅值的跟踪,可以通过储能装置对配电网进行补充作用。孤岛运行时,双向 AC/DC 变流器配合调度指令,也可以通过双向 AC/DC 变流器

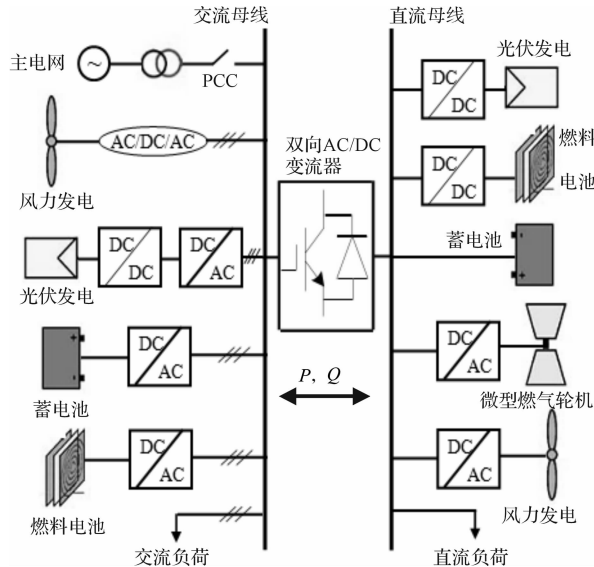


图 1 交直流混合微电网的结构

的控制,使得功率实现双向流动。此时,微电网系统的稳定控制,维持微电网电压稳定在允许范围内。不管微电网处于何种运行方式,双向 AC/DC 变流器都对配电网进行检测,也可以实现两种运行方式的平滑切换。

2 双向 AC/DC 变流器的数学模型

在微电网系统中,根据功率的流向,双向 AC/DC 变流器可分成两种模式^[10]:整流模式(AC/DC)和逆变模式(DC/AC)。双向 AC/DC 变流器模型的结构框图如图 2 所示。

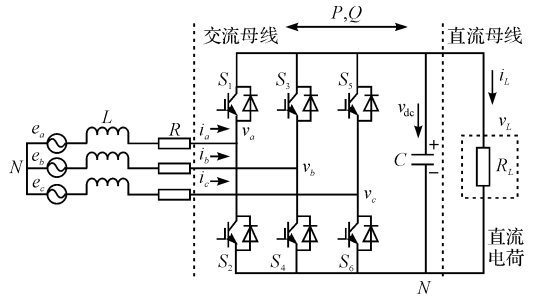


图 2 双向 AC/DC 变流器模型的结构框图

e_a, e_b, e_c —交流侧三相电压; i_a, i_b, i_c —三相线电流; v_{dc} —直流侧电压; R, L —滤波电抗器的电阻和电感; i_L —直流侧负荷电流; C —直流侧电容; R_L —直流负荷; N —三相系统的中性点; N' —流侧电容的负极; P, Q —双向 AC/DC 变流器注入网络的有功功率和无功功率

2.1 整流器(AC/DC)数学模型

在图 2 中,假设三相交流电压对称,并忽略三相交流线路电阻和电感的不对称性,可以建立三相静止坐标系下的三相电压型 PWM 整流器(VSR)数学模型^[11],如下式所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - (v_a + v_{NN'}) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - (v_b + v_{NN'}) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - (v_c + v_{NN'}) \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - i_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{a,b,c}$ —二值开关函数, $S_{a,b,c} = 1$ 表示上桥臂开关导通,下桥臂开关关断, $S_{a,b,c} = 0$ 表示下桥臂开关导通,上桥臂开关关断。

交流电能经 AC/DC 变流器整流后,通过直流侧电容 C 接入直流母线。以交流侧电感电流 i_i 与直流侧电压 v_{dc} 为状态变量,可以表示为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = e_d - v_d + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = e_q - v_q - \omega Li_d \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(i_d S_d + i_q S_q) - i_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_d, e_q —电网电动势无量 e_{dq} 的 d, q 分量; v_d, v_q —三相 VSR 交流侧电压无量 v_{dq} 的 d, q 分量; i_d, i_q —三相 VSR 交流侧电流 i_{dq} 的 d, q 分量; S_d, S_q — dq 坐标系中单极性二值逻辑开关函数。

2.2 逆变器 (DC/AC) 数学模型

当微电网并网运行时, 双向 AC/DC 变流器的工作状态相当于逆变器, 通过 LC 滤波器滤除高次谐波后, 接入交流母线。双向 AC/DC 变流器在 dq 坐标系下的数学模型^[12], 可以表示为:

$$\begin{cases} C \frac{dv_{od}}{dt} - \omega C v_{oq} = i_{Ld} - i_{od} \\ C \frac{dv_{oq}}{dt} + \omega C v_{od} = i_{Lq} - i_{oq} \\ L \frac{di_{Ld}}{dt} + r i_{Ld} - \omega L i_{Lq} = v_d - v_{od} \\ L \frac{di_{Lq}}{dt} + r i_{Lq} + \omega L i_{Ld} = v_q - v_{oq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{od}, v_{oq} — v_{odq} 的 d 轴和 q 轴分量; i_{od}, i_{oq} — i_{odq} 的 d 轴和 q 轴分量; i_{Ld}, i_{Lq} — i_{Ldq} 的 d 轴分量和 q 轴分量。

3 微电网电压稳定控制策略

3.1 传统下垂控制原理

下垂控制的原理是分布式电源在线路等效阻抗呈感性时, 可以实现 $P-f$ 和 $Q-V$ 的解耦^[13], 分布式电源并网的等效线路如图 3 所示。

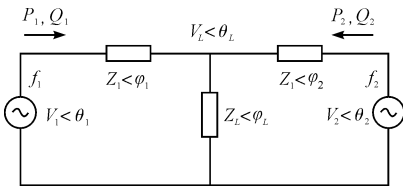


图 3 分布式电源并网的等效线路

双向 AC/DC 变流器的输出功率如下式所示:

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_i V_L}{Z_i} \cos(\varphi_i - \theta_{iL}) - \frac{V_L^2}{Z_i} \cos \varphi_i \\ Q_i = \frac{V_i V_L}{Z_i} \sin(\varphi_i - \theta_{iL}) - \frac{V_L^2}{Z_i} \sin \varphi_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_i, Q_i —双向 AC/DC 变流器 i 输出的有功功率和无功功率; Z_i, φ_i —双向 AC/DC 变流器 i 和 PCC 点输出线路阻抗的幅值和相角; V_i, V_L —双向 AC/DC 变

流器输出电压与 PCC 点电压的幅值; θ_{iL} —双向 AC/DC 变流器 i 的输出电压相量和 PCC 点电压相量的相角差 $\theta_{iL} = \theta_i - \theta_L$ 。

从式(4)可以看出, 当线路的阻抗确定之后, 双向 AC/DC 变流器输出的功率与其输出电压的幅值和相角有关。因此, 传统电力系统的调频采用一次调频的有差控制原理, 可以通过双向 AC/DC 变流器的输出功率与输出电压的幅值、相角之间的 Droop 控制, 使功率在双向 AC/DC 变流器之间分配。通常采用情况下, θ_{iL} 较小, 可以认为 $\theta_{iL} \approx 0^\circ$ 。不同的线路阻抗模型下, 双向 AC/DC 变流器的输出功率表达式与相应的 Droop 控制方程式如下文所示。当线路阻抗主要是感性, $\varphi_i \approx 90^\circ, Z \approx jX$ 时, 有:

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_i V_L}{X_i} \theta_{iL} \\ Q_i = \frac{V_L}{X_i} (V_i - V_L) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_i = f_i^* - m_{iP} (P_i - P_i^*) \\ V_i = V_i^* - n_{iQ} (Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_{iP}, n_{iQ} —下垂系数; V_i^*, f_i^* —电压和频率参考值; P_i^*, Q_i^* —有功功率、无功功率参考值。当线路阻抗主要是阻性, $\varphi_i \approx 0^\circ, Z \approx R$ 时, 有:

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_L}{R_i} (V_i - V_L) \\ Q_i = \frac{V_i V_L}{R_i} \theta_{iL} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_i = f_i^* - n_{iQ} (Q_i - Q_i^*) \\ V_i = V_i^* - m_{iP} (P_i - P_i^*) \end{cases} \quad (6)$$

从式(5,6)可以看出, 根据线路参数特性, 低压、高压的功率传输表达式有所不同, 从而下垂控制的表达式也有所不同。

3.2 微电网电压稳定的分析

微电网中的分布式电源通过电力电子设备接入配电系统, 因此其响应速度很快, 当系统受到一个很小扰动时, 系统电压和频率可能在短时间发生较大的变化, 严重影响系统的微电网电压稳定性^[14]。

3.2.1 有功功率分配

当微电网系统稳态运行时, 所有双向 AC/DC 变流器的工作和频率都一样, 即 $f_1 = f_2$, 也可以根据式(5), 只需在 Droop 控制中使所有双向 AC/DC 变流器输出的额定功率和参考频率相同。另外, 下垂系数与其额定功率成反比, 可以表示为:

$$\begin{cases} f_1^* = f_2^* \\ m_{1P} P_1^* = m_{2P} P_2^* \end{cases} \quad (7)$$

双向 AC/DC 变流器输出的有功功率按其额定功率分配的目的, 可以表示为:

$$m_{1P} P_1 = m_{2P} P_2 \quad (8)$$

如果有功功率在双向 AC/DC 变流器之间能够分配,可以表示为:

$$m_{1P} \frac{V_1 V_L}{X_1} \theta_{1L} = m_{2P} \frac{V_2 V_L}{X_2} \theta_{2L} \quad (9)$$

如果 $\theta_{1L} = \theta_{2L}$, $V_1 = V_2$, 那么:

$$\frac{m_{1P}}{X_1} = \frac{m_{2P}}{X_2} \quad (10)$$

3.2.2 无功功率分配

从式(5)可以看出,在式(11,12)的前提下,要保证无功功率按照额定功率分配,使式(13)成立的条件为 $e_1 = e_2$ 。

$$V_1^* = V_2^* \quad (11)$$

$$n_{1Q} Q_1^* = n_{2Q} Q_2^* \quad (12)$$

$$n_{1Q} Q_1 = n_{2Q} Q_2 \quad (13)$$

由于无功功率/电压 ($Q - V$) 下垂曲线的斜率较小,电压之间很小的偏差就会导致很大的无功功率偏差。此时,很容易造成双向 AC/DC 变流器的过流。从式(5)可以看出,在式(11,12)成立的前提条件,双向 AC/DC 变流器之间的电压偏差可以表示为:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = n_{2Q} Q_2 - n_{1Q} Q_1 \quad (14)$$

式(5)中的 $Q - V$ 下垂方程式代入式(5)中的无功功率可以表示为:

$$Q_i = \frac{V_L V_i^* - V_L^2}{X_i + n_{iQ} V_L} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),有:

$$\Delta V = \frac{V_2^* - V_L}{1 + \frac{X_2}{n_{2Q} V_L}} - \frac{V_1^* - V_L}{1 + \frac{X_1}{n_{1Q} V_L}} \quad (16)$$

从式(16)可以看出,在式(11)和式(12)成立的前提条件,只有当式(17)成立时才能保证电压 (V_1) 和电压 (V_2) 都一样 $V_1 = V_2$, 即 $f_1 = f_2$, 实现无功功率在双向 AC/DC 变流器之间按额定容量进行分配。

$$\frac{X_1}{n_{1Q}} = \frac{X_2}{n_{2Q}} \quad (17)$$

根据以上分析,采用传统的 Droop 控制实现有功功率和无功功率分配的条件是以下两式同时满足:

$$\begin{cases} m_{1P} P_1^* = m_{2P} P_2^* \\ n_{1Q} Q_1^* = n_{2Q} Q_2^* \\ f_1^* = f_2^* \\ V_1^* = V_2^* \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} V_1 = V_2 \\ \frac{X_1}{n_{1Q}} = \frac{X_2}{n_{2Q}} \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_{1L} = \theta_{2L} \\ \frac{X_1}{m_{1P}} = \frac{X_2}{m_{2P}} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

从式(18,19)可以表明,同时满足下述条件:①额定功率下的参考频率与参考电压设置相同;②下垂系

数和其容量成反比;③线路的阻抗和双向 AC/DC 变流器的容量成反比;④双向 AC/DC 变流器的输出电压幅值和相位相同,才能实现不同容量双向 AC/DC 变流器之间的有功功率和无功功率分配。为了解决上述问题(微电网电压的稳定运行),本研究提出一种改进型 $P - f$ 和 $Q - V$ 的自适应下垂系数控制策略。

3.2.3 下垂控制改进

下垂特性如图4所示。

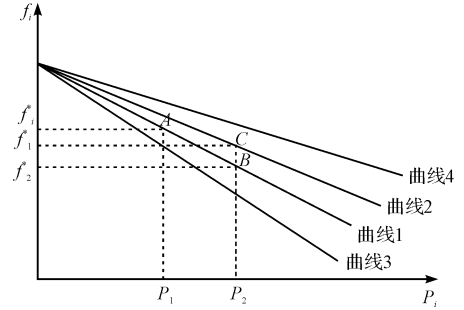


图4 下垂特性

从式(5)可以看出,传统的 Droop 控制中的下垂系数不变化,当微电网和主电网断开时可能存在较大的功率缺额,微电源需要发出较大的有功功率或者无功功率,并且微电网频率和电压下降幅度将很大,这会引发运行不稳定的微电网。如果采用自适应下垂系数,工作曲线将动态变化可以解决频率和电压下降过快,减小微电网暂态冲击^[15]。因此,自适应下垂系数应该保证系统的稳定性和灵敏度。根据以上分析,改进下垂系数控制可以表示为:

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - \left(m_{iP} - 1 + \frac{f_i}{f_i^*} \right) (P_i - P_i^*) \\ V_i = V_i^* - \left(n_{iQ} - 1 + \frac{V_i}{V_i^*} \right) (Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (20)$$

其中: $k_f = m_{iP} - 1 + f_i/f_i^*$, $k_v = n_{iQ} - 1 + V_i/V_i^*$ 。当频率不变化时, $f_i = f_i^*$, $f_i/f_i^* = 1$, $k_f = m_{iP}$, 自适应下垂系数和传统下垂系数都一样,工作曲线不变化。当频率变小 $f_i < f_i^*$ 时, $f_i/f_i^* < 1$, $k_f = m_{iP} - 1 + f_i/f_i^* < m_{iP}$, 自适应下垂系数控制小于传统下垂系数控制,曲线斜率将变小,频率将会增大,最后在工作曲线1和工作曲线4之间达到动态平衡。当频率变大 $f_i > f_i^*$ 时, $f_i/f_i^* > 1$, $k_f = m_{iP} - 1 + f_i/f_i^* > m_{iP}$, 自适应下垂系数控制大于传统下垂系数控制,曲线斜率将变大,频率将会减小,最后在工作曲线1和工作曲线3之间达到动态平衡。同理也适用于 $Q - V$ 自适应下垂系数控制工作曲线。从式(20)可以看出,为了自适应下垂系数控制得到的参考信号可以直接作用于双向 AC/DC 变流器控制,但

是由于双向 AC/DC 变流器的输出电压受负载不对称性或者负载非线性影响较大,于是在自适应下垂系数控制后增加电压控制,防止产生电压波动,可以得到电流内环控制器的参考为 i_{Ld}^*, i_{Lq}^* [16]。由式(20)可得的 $P-f$ 和 $Q-V$ 的自适应下垂系数控制框图,如图 5 所示。

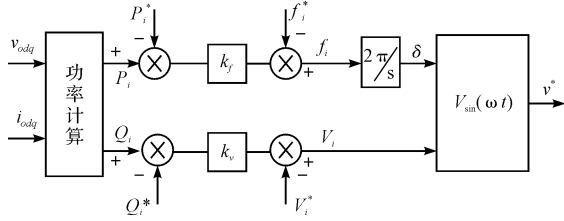


图 5 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂系数控制框图

3.3 双向 AC/DC 变流器的控制策略

双向 AC/DC 变流器的控制系统设计中,一般采用双闭环控制,即采用电压外环和电流内环的控制方法[17]。电压外环主要是维持中间交流侧 v_{odq} 的稳定,电压外环控制一般采用 PI 控制器。电压控制的数学模型,可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{i}_{Ld}^* = i_{od} - \omega C v_{oq} + K_{PV}(v_{od}^* - v_{od}) + K_{IV}(v_{od}^* - v_{od}) \\ \dot{i}_{Lq}^* = i_{oq} - \omega C v_{od} + K_{PV}(v_{oq}^* - v_{oq}) + K_{IV}(v_{oq}^* - v_{oq}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: i_{Ld}^*, i_{Lq}^* —电感电流参考值的 d 轴和 q 轴分量; v_{od}^*, v_{oq}^* — v_{od}, v_{oq} 电压指令值; K_{PV}, K_{IV} —电压控制中 PI 控制的比例参数和积分参数。

电流内环主要是按照电压外环输出的电流指令进行电流控制,电流内环控制一般采用 PI 控制器,电流控制的数学模型,可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{v}_{id}^* = -\omega L i_{Lq} + K_{PC}(i_{Ld}^* - i_{Ld}) + K_{IC}(i_{Ld}^* - i_{Ld}) \\ \dot{v}_{iq}^* = \omega L i_{Ld} + K_{PC}(i_{Lq}^* - i_{Lq}) + K_{IC}(i_{Lq}^* - i_{Lq}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: v_{id}^*, v_{iq}^* —逆变桥调制电压信号的 d 轴和 q 轴分量; i_{Ld}, i_{Lq} — i_{Ld}, i_{Lq} 的 d 轴分量和 q 轴分量; K_{PC}, K_{IC} —电流控制中 PI 控制的比例参数和积分参数。

另外,在图 2 中(双向 AC/DC 变流器的拓扑结构),建立采用开关函数的 VSR 模型,本研究采用的控制策略在并网运行时分两种情况[18]:当 $v_L < v_{dc}$ 时,双向 AC/DC 变流器运行于整流模式(AC/DC),功率由主电网流向直流侧。当 $v_L > v_{dc}$ 时,双向 AC/DC 变流器运行于逆变模式(DC/AC),功率由直流侧流向主电网。双向 AC/DC 变流器在旋转坐标系下控制策略如图 6 所示。

4 系统仿真与结果分析

为了验证上述控制策略的正确性,本研究利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型,仿真模型如图 7 所示。系统的主电路参数:电源线电压为 $V_g = 380$ V;电网频

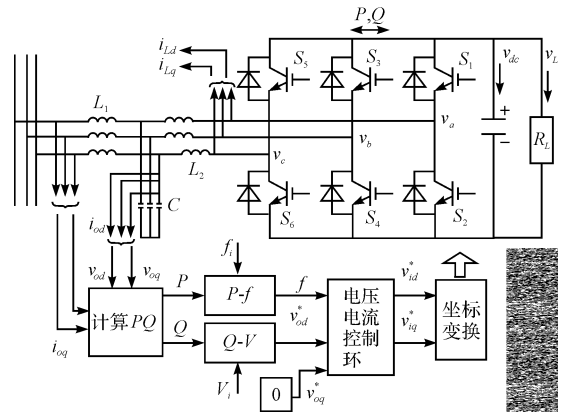


图 6 双向 AC/DC 变流器控制策略的结构框图

率为 $f_g = 50$ Hz;电感为 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0.35$ mH;电阻为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.03$ Ω;线路电阻为 $R_{L1} = 0.23$ Ω, $R_{L2} = 0.35$ Ω; $R_{L3} = 0.23$ Ω;线路电感为 $L_{L1} = 318$ μH, $L_{L2} = 1487$ μH; $L_{L3} = 318$ μH;负荷(1)的功率为 $P_1 = 15$ kW, $Q_1 = 12$ kvar;负荷(2)的功率为 $P_2 = 20.3$ kW, $Q_2 = 7.6$ kvar。控制器参数:双向 AC/DC 变流器开关频率为 3 kHz;电压外环为 $K_{PV} = 0.1, K_{IV} = 420$;电流内环为 $K_{PC} = 15, K_{IC} = 16 \times 10^3$;下垂系数为 $k_f = 1, k_v = 10$ 。微电网中的分布式电源包括 DG1、DG2、DG3 和 DG4。

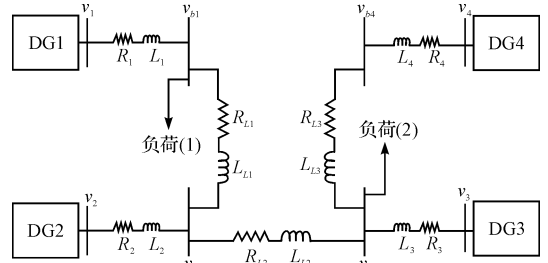


图 7 系统仿真模型

双向 AC/DC 变流器的仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知,整流模式输出的直流电压为 $V_{DC} = 650$ V,逆变模式输出的交流电压为 $V_{AC} = 380$ V。

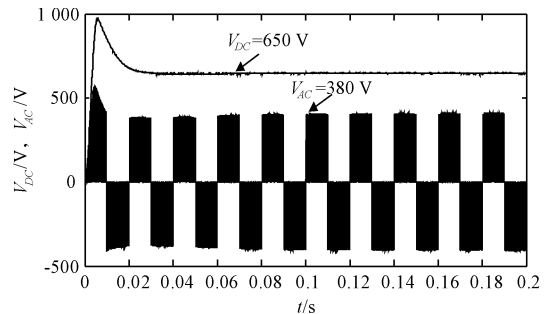


图 8 双向 AC/DC 变流器输出电压波形

微电网输出的有功功率(P_{MG})和无功功率(Q_{MG})如图 9 所示。微电网有两种基本的运行方式包括孤岛运行和并网运行:

(1)微电网在 0~0.1 s 孤岛运行。通过图 9 中的仿真结果可以得出,在 $t=0.02$ s 之前,微电网中的分布式电源还没有输出功率;在 $t=0.02$ s 之后,微电网输出的有功功率分别为 $DG1=3$ kW、 $DG2=10$ kW、 $DG3=6.5$ kW、 $DG4=2$ kW。微电网输出的无功功率分别为 $DG1=7.5$ kvar、 $DG2=9$ kvar、 $DG3=5$ kvar、 $DG4=4$ kvar。频率响应如图 10 所示。包括微电网频率 f_{MG} 和主电网频率 f_g 。在 0.02 s~0.1 s 之间,微电网输出的电压不稳定和电压相角(包括微电网的电压相角 θ_{MG} 、主电网的电压相角 θ_g)如图 11 所示。根据 IEEE 1547 标准^[19],对于容量为(0~500 kVA)的分布式电源,进行并网时,允许频率偏差为 ± 0.3 Hz,允许电压偏差为 $\pm 10\%$ 和相角偏差为 $\pm 20^\circ$ 。因此,在图 10、图 11 中的仿真结果可以显示,频率和电压的偏差不超过 IEEE 1547 标准所规定的允许极限,即符合该标准。

(2)微电网在 0.1 s~0.2 s 并网运行,当负荷变化时或分布式电源输出功率的波动性,微电网输出的有功功率分别为 $DG1=22$ kW、 $DG2=15$ kW、 $DG3=13$ kW、 $DG4=8$ kW。如图 9 所示,微电网输出的无功功率分别为 $DG1$ 为负值、 $DG2=3$ kvar、 $DG3=3$ kvar、 $DG4=1$ kvar。同时,微电网的电压和主电网的电压都为 380 V(电压稳定 $V_{MG}=V_g=380$ V),微电网的频率和主电网的频率都为 50 Hz(频率稳定 $f_{MG}=f_g=50$ Hz),微电网的电压相角和主电网的电压相角都为 $\theta_{MG}=\theta_g$ 如图 10、图 11 所示。因此,通过仿真结果可以得出,并网后,分布式电源输出功率的波动性时微电网电压仍保持平衡和稳定。

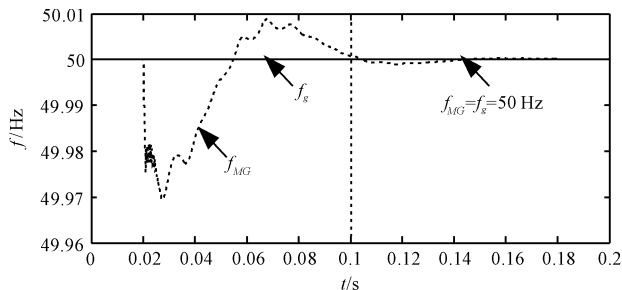
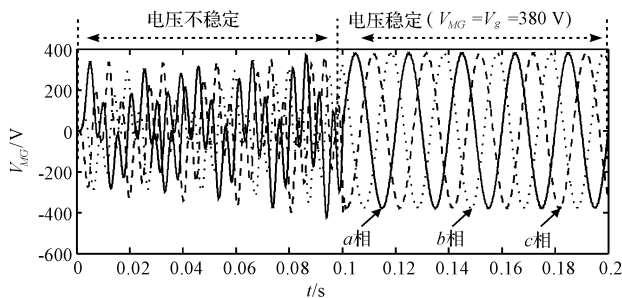
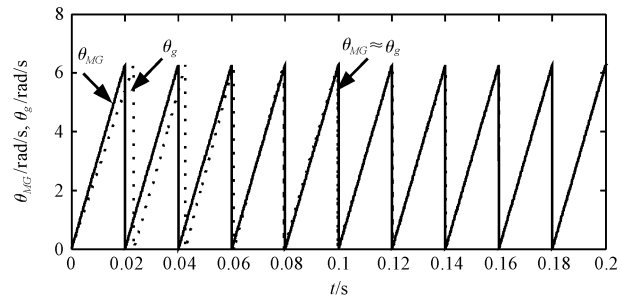


图 10 频率响应



(a) 电压波形



(b) 电压相角波形

图 11 微电网输出的电压和相角波形

此外,孤岛至并网和并网至孤岛的模式切换图如图 12 所示。通过图 12 中的仿真结果可以得出,在孤岛模式下,三相电压有效值为 365 V。在并网模式下,三相电压有效值为 380 V。因此,在孤岛和并网模式下,双向 AC/DC 变流器微电网运行稳定,电能质量达到标准。

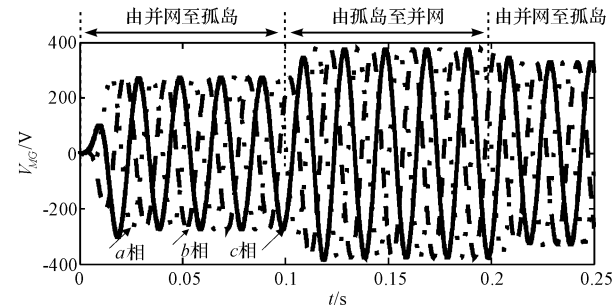
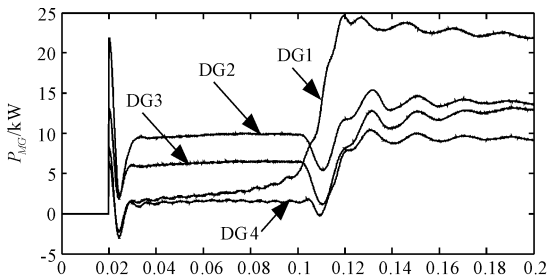
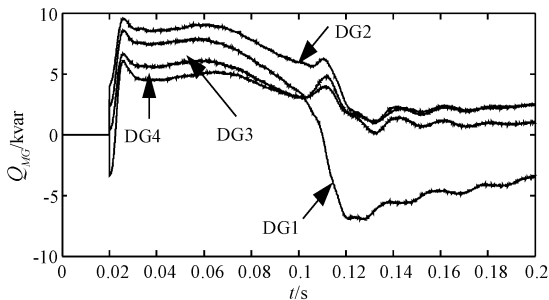


图 12 微电网输出电压波形(两种模式的切换)



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图 9 微电网输出的功率

5 结束语

本研究解决了以下问题:分布式电源的微电网电

压稳定采用改进下垂控制方法,通过双向 AC/DC 变流器的控制策略不仅提高了系统供电可靠性,而且保证了微电网各种运行方式的无缝切换;在考虑到负荷变化和分布式电源出力的波动性的情况下,并入电网的微电网系统的频率和电压幅值一直保持稳定,频率偏差、电压偏差、相角偏差都在允许范围内,符合 IEEE1547 标准。

通过 Matlab/Simulink 仿真,结果表明,该双向 AC/DC 变流器能稳定地控制微电网电压,具有很好的稳态性能。

参考文献 (References):

- [1] 杨海晶,李朝晖,石光,等. 微网孤岛运行下储能控制策略的分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(3):67-71.
- [2] 李鹏,张玲,盛银波. 新能源及可再生能源并网发电规模化应用的有效途径—微网技术[J]. 华北电力大学学报,2009,36(1):10-14.
- [3] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18.
- [4] 孙芊,王倩,杨利萍,等. 针对分布式光伏接入的配电网改造方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(5):60-65.
- [5] 吴云亚,阚加荣,谢少军. 适用于低压微电网的逆变器控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(6):39-44.
- [6] 韩培洁,张惠娟,李贺宝,等. 微电网控制策略分析研究[J]. 电网与清洁能源,2012,28(10):25-30.
- [7] 吕志鹏,罗安,蒋雯倩. 多逆变器环境微网环流控制新方法[J]. 电工技术学报,2012,27(1):40-47.
- [8] 张建华,苏玲,陈勇,等. 微网的能量管理及其控制策略[J]. 电网技术,2011,35(7):24-28.
- [9] RAHMANOV N R, TABATABAEI N M, DURSUN K, et al. Combined AC-DC microgrids: Case study-network development and simulation [J]. **International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering**,2012,4(12):157-161.
- [10] 唐磊,曾成碧,苗虹,等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):13-18.

- [11] ZENG zhi-hui, ZHANG yi-ming, YU Fei, et al. Study of new three-phase voltage source PWM rectifier[J]. **International Journal of Digital Content Technology and its Applications (JDCTA)**,2013,7(6):1088-1096.
- [12] MA Liang, RAN Wang, ZHENG T Q. Modeling and Control of Three-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter [C]//8th IEEE International Conference on Control and Automation. Xiamen, China:[s. n.],2010:2240-2245.
- [13] LIU Zhen, OUYANG Shu-guang, BAO Wei-yu. An Improved Droop Control Based on Complex Virtual Impedance in Medium Voltage Micro-grid[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific. Beijing:[s. n.],2013.
- [14] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2010,25(2):796-808.
- [15] 张明光,张义娜,孙慧丽,等. 微电网系统中多种逆变器的并联组网控制策略[J]. 兰州理工大学学报,2014,40(4):86-91.
- [16] 苏虎,曹炜,孙静,等. 基于改进下垂控制的微网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):92-98.
- [17] 张玉海,王新超,许志成,等. 微网保护分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(11):55-60.
- [18] HUANG Ming-shi, YEH P Y, HUANG Jia-rong, et al. Novel Bi-directional AC-DC Converter for Electrical Vehicle Battery Testing[C]//37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne:[s. n.],2011:1480-1485.
- [19] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE 1547, Application guide for IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power system [S], The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2008.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

艾欣,LE Kim Anh, DANG Ngoc Huy. 微电网电压稳定控制策略研究[J]. 机电工程,2015,32(1):82-88.

AI Xin, LE Kim Anh, DANG Ngoc Huy. Study on voltage stability control strategy of microgrid[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(1):82-88.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>