

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.06.007

适用于低压微电网的逆变器控制策略设计

吴云亚¹, 阚加荣¹, 谢少军²

(1. 盐城工学院实验教学部, 江苏省盐城市 224051; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏省南京市 210016)

摘要: 低压微电网中线路阻抗呈阻性, 为保证逆变器输出阻抗与线路阻抗相匹配, 在逆变器控制策略中引入了阻性虚拟阻抗。分析了逆变器电压环积分参数对逆变器输出阻抗的影响, 在保证逆变器稳定运行的前提下, 提高电压环积分系数可使逆变器输出阻抗呈阻性。对微电网等效电路分析得出, 调节逆变器输出电压幅值可以调节逆变器输出的有功功率, 调节逆变器的频率可以调节逆变器输出的无功功率。微电网并网运行时, 分析了参数检测误差对逆变器输出功率的影响, 在下垂特性控制中, 引入幅值和频率微调的比例-积分(PI)调节器, 可实现逆变器输出功率的无静差跟踪。仿真结果表明, 所提逆变器控制策略运行稳定, 在并网和孤岛运行时都具有优良的性能。

关键词: 低压微电网; 逆变器; 分布式电源; 输出阻抗; 线路阻抗; 下垂特性控制

0 引言

分布式电源技术是未来能源技术发展的重要方向, 但其在电网中的分散性使得难以对它们进行综合管理。而微电网是从系统的角度将多台分布式电源与负载组成单一的可控单元, 只有一个接口与大电网相连^[1]。与单个的分布式电源相比, 微电网更能充分发挥分布式电源的各项优势, 实现大规模并网, 同时向用户提供不间断电源(UPS)服务。目前, 微电网越来越受到人们的关注^[2-3]。

在单个分布式电源中, 并网逆变器常采用直接电流控制方法^[4], 但在孤岛运行时, 存在控制模式切换的问题^[5]。为了克服这一问题, 越来越多的研究采用间接电流控制方法^[6-10], 即采用电压控制型逆变器作为并网装置。在微电网中, 对逆变器控制策略的研究大多集中在幅值和频率下垂控制方法上^[7-10], 在该控制方法中, 各逆变器相互独立, 在并网运行和独立(孤岛)运行时无需进行控制模式切换。

在低压微电网中, 各台分布式电源与并联母线之间的线路阻抗主要呈阻性^[11], 而采用电感电流内环、输出电压外环的逆变器输出阻抗主要呈感性, 这使得逆变器输出的有功功率、无功功率与逆变器输出电压的相位、幅值之间的耦合比较严重。虽然功率解耦控制策略适用于 UPS 并联系统^[12], 但在低压微电网中, 各分布式电源的距离较远且不固定, 这造成各分布式电源与低压微电网之间的线路阻抗很难估算, 而功率解耦需要预知线路阻抗与逆变器输

出阻抗之和精确的阻感比例, 因此功率解耦不能作为微电网中逆变器的控制策略。

在微电网并网运行时, 电网电压的幅值、频率的测量精度直接影响逆变器输出功率。此外由于逆变器存在输出阻抗, 逆变器的电压基准值与实际输出值之间会存在一定的差异, 这也导致了基于下垂特性的逆变器在并网时输出功率与基准功率之间存在较大差异。

针对以上问题, 本文在逆变器控制策略中引入虚拟阻抗^[13-14], 并合理设计了逆变器控制参数, 在逆变器输出阻抗呈阻性时, 则可采用简单的有功调幅、无功调频的下垂特性控制策略。在并网模式时, 引入频率、幅值微调环使逆变器输出功率完全跟踪基准值。仿真结果验证了逆变器控制策略性能优良。

1 微电网结构

典型的低压微电网结构如图 1 所示。

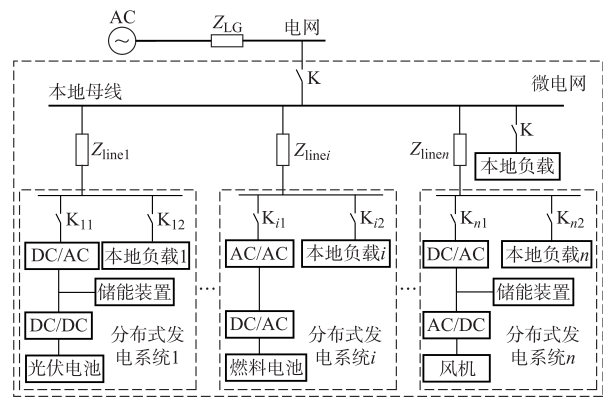


图 1 低压微电网的典型结构

Fig. 1 Typical structure of a low voltage microgrid

收稿日期: 2011-03-08; 修回日期: 2011-08-05。
国家自然科学基金资助项目(51077070, 51107108)。

由图 1 可以看出,微电网由多个分布式电源系统构成,提供能量的分布式电源是如光伏电池、燃料电池、风电机组等无排放的新能源。由于分布式电源系统在位置上的分散性,使得分布式电源与本地母线之间存在一定的距离,造成它们之间存在一定的线路阻抗,图中用 Z_{linei} 表示; Z_{LG} 为电网中的电路阻抗。电网正常时,静态开关 K 闭合,微电网处于并网运行状态;电网故障时,K 断开,微电网处于独立运行状态。

2 微电网中逆变器的控制策略

不同电压等级下典型线路参数^[11]如表 1 所示。

表 1 不同电压等级下的典型线路参数

Table 1 Typical line parameters of different voltage levels

线路类型	$R/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$X/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	R/X
低压线路	0.642	0.083	7.70
中压线路	0.161	0.190	0.85
高压线路	0.060	0.191	0.31

由表 1 可以看出,低压线路中线路阻抗主要呈阻性,如果逆变器的输出阻抗呈感性,则需要对逆变器进行功率解耦控制,但单台逆变器与本地母线之间的阻抗很难匹配,所以解耦控制不能完全消除各台逆变器之间的功率误差^[12]。若逆变器输出阻抗同线路阻抗相匹配(也呈阻性),则可用简单的下垂特性控制逆变器的输出功率。

2.1 逆变器阻性输出阻抗的设计

基于虚拟阻抗的逆变器控制策略如图 2 所示。

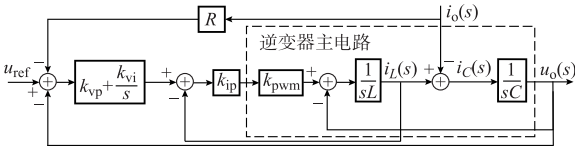


图 2 基于虚拟阻抗的逆变器控制策略
Fig. 2 Inverter control strategy based on virtual impedance

由图 2 可以看出:逆变器采用瞬时输出电压外环,电压外环采用比例-积分(PI)调节器,PI 调节器的输出作为电感电流瞬时值反馈的基准值;因为电感电流内环的主要作用是抑制 LC 的谐振尖峰,对电感电流跟踪的精度要求不高,所以内环采用比例调节器;在传统的瞬时电压外环、电感电流内环的基础上引入了阻性虚拟阻抗,可有效提高逆变器输出阻抗中的阻性分量。图 2 中, L 和 C 分别为逆变器的滤波电感和滤波电容; R 为引入的虚拟阻抗; k_{vp} 和 k_{vi} 分别为电压环的比例系数和积分系数; k_{ip} 为电流环的比例系数; k_{pwm} 为逆变器的基波等效放大倍数; i_C , i_L 和 i_o 分别为逆变器滤波电容、滤波电感和

负载的电流; u_o 为逆变器输出电压; u_{ref} 为逆变器基准电压。

在图 2 所示的控制策略下,逆变器输出电压为:

$$u_o(s) = G(s)u_{ref}(s) - Z_o(s)i_o(s) \tag{1}$$

其中

$$G(s) =$$

$$\frac{sk_{vp}k_{ip}k_{pwm} + k_{vi}k_{ip}k_{pwm}}{s^3LC + s^2Ck_{ip}k_{pwm} + s(1 + k_{vp}k_{ip}k_{pwm}) + k_{vi}k_{ip}k_{pwm}}$$

$$Z_o(s) =$$

$$\frac{s^2L + s(Rk_{vp} + 1)k_{ip}k_{pwm} + Rk_{vi}k_{ip}k_{pwm}}{s^3LC + s^2Ck_{ip}k_{pwm} + s(1 + k_{vp}k_{ip}k_{pwm}) + k_{vi}k_{ip}k_{pwm}}$$

式中: Z_o 为逆变器输出阻抗。

系统的特征方程为:

$$D(s) = s^3LC + s^2Ck_{ip}k_{pwm} + s(1 + k_{vp}k_{ip}k_{pwm}) + k_{vi}k_{ip}k_{pwm} \tag{2}$$

逆变器电压环的积分系数 k_{vi} 对逆变器的输出阻抗影响较大,下面分析 k_{vi} 和 R 变化时对逆变器输出阻抗的影响。根据逆变器稳定运行的要求,确定了一组逆变器运行参数: $k_{vp}=1$, $k_{pwm}=33.3$, $k_{ip}=1$, 输出电压频率为 50 Hz, 开关频率 $f_{sw}=20$ kHz, $L=1$ mH, $C=30$ μ F。

从式(2)可以看出,虚拟阻抗 R 对逆变器系统的稳定性没有影响,而逆变器电压环的积分系数对系统稳定性产生影响,因此应先确定逆变器稳定运行时 k_{vi} 值的范围。

当 k_{vi} 从 0 到 20 000 变化时,逆变器系统闭环特征根 λ 的情况如图 3 所示。

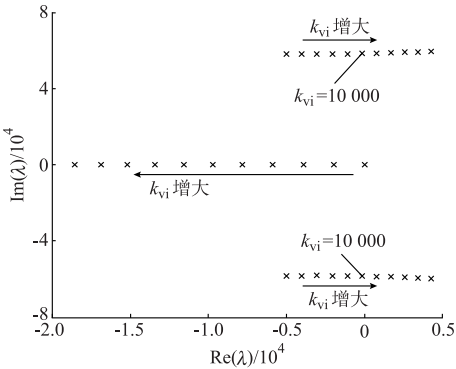


图 3 逆变器闭环系统根轨迹
Fig. 3 Root locus of inverter loop system

由图 3 可以看出,在 k_{vi} 小于 10 000 的情况下系统稳定。

k_{vi} 和 R 变化时,逆变器性能变化如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,电压环积分系数越大,逆变器的输出电压对基准电压的跟踪越精确,并且两者之间的相位差越小。从图 4(b)可以看出:随着积分系数的增大,逆变器输出阻抗幅值变小;在引入虚拟阻

抗后,在积分系数增大的过程中,逆变器输出阻抗幅值趋近于虚拟阻抗 R 的大小。从图 4(c)可以看出:在未加虚拟阻抗时,随着积分系数的增大,输出阻抗接近于感性负载;而在加了虚拟阻抗后,随着积分系数的增大,输出阻抗接近于阻性负载。

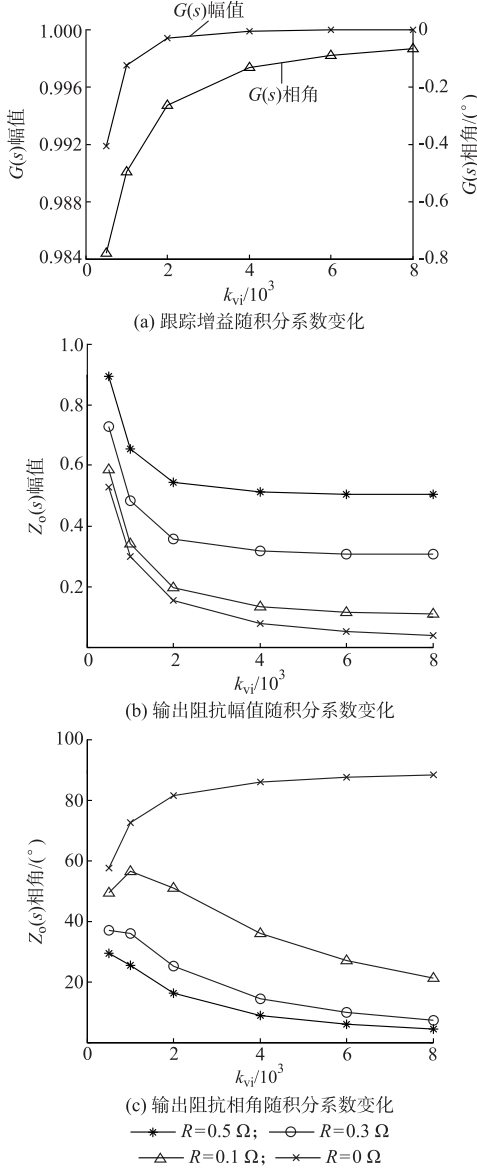


图 4 参数变化对逆变器性能的影响

Fig. 4 Performance of the inverter affected by different parameters

在电压环积分系数保证系统稳定的前提下,虚拟阻抗可以使逆变器输出阻抗呈阻性,但也导致逆变器输出电压外特性变软。因此,综合考虑选取 $R=0.3 \Omega$, $k_{vi}=3\ 000$,此时逆变器输出阻抗 $Z_o=0.32\angle 20^\circ \Omega$,该值感性分量较小,能与表 1 中典型低压微电网中的线路阻抗相匹配,逆变器的功率环可采用简单的有功调幅、无功调频的下垂控制策略。

2.2 基于下垂特性的逆变器并网/并联控制策略

逆变器输出阻抗和线路阻抗呈阻性时的微电网运行等效电路如图 5 所示。

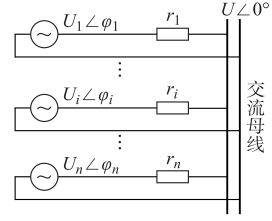


图 5 微电网运行等效电路

Fig. 5 Operation equivalent circuit of microgrid

图 5 中, $U \angle 0^\circ$ 代表微电网中交流母线电压,当微电网处于并网模式时, $U \angle 0^\circ$ 为电网电压,当微电网孤岛运行时, $U \angle 0^\circ$ 为各逆变器并联运行电压; $U_i \angle \varphi_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为逆变器 i 的输出电压,其中 φ_i 为逆变器 i 与母线之间的相位差; r_i 为逆变器 i 的输出阻抗与该逆变器到母线之间的线路阻抗之和。根据图 5 得到逆变器 i 输出的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i :

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i U \cos \varphi_i - U^2}{r_i} \approx \frac{U_i U - U^2}{r_i} \\ Q_i = -\frac{U_i U \sin \varphi_i}{r_i} \approx -\frac{U_i U}{r_i} \varphi_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

对式(3)求微分得到:

$$\begin{cases} \Delta P_i \approx \frac{U}{r_i} \Delta U_i \\ \Delta Q_i \approx -\frac{U_i U}{r_i} \Delta \varphi_i \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可以看出,调节逆变器输出电压的幅值可以调节逆变器输出的有功功率,调节逆变器与母线之间的相位差可以调节逆变器输出的无功功率。一般情况下,逆变器相位的调节都是通过改变频率来实现的。因此,在逆变器双环控制的基础上,采用下垂控制策略,即

$$\begin{cases} U_i = U_i^* - k_{dvi}(P_i - P_i^*) \\ f_i = f_i^* - k_{dfi}Q_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} k_{dvi} = \frac{U_i^* - U_{\min}}{P_{\max i} - P_i^*} \\ k_{dfi} = \frac{f_i^* - f_{\max}}{Q_{\max i}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_i^* 和 f_i^* 分别为逆变器 i 的电压基准幅值和频率基准值,微电网中所有逆变器单元的电压基准幅值和频率基准值都相等; P_i^* 和 P_i 分别为逆变器 i 的有功功率基准值和实际输出值; Q_i 为逆变器 i 输出的无功功率,一般情况下无功功率基准值等于 0; k_{dvi} 和 k_{dfi} 分别为逆变器 i 的幅值下垂系数和频率

下垂系数,其中 k_{dfi} 为负值; $U_{\min}$ 为逆变器基准电压最小值; $f_{\max}$ 为逆变器基准频率最大值; $P_{\max i}$ 和 $Q_{\max i}$ 分别为逆变器 i 的最大有功功率和最大无功功率。

具体的下垂系数还要保证逆变器能稳定运行,在稳定运行的基础上,按照式(6)算得的2个值的比例选取。

逆变器下垂特性示意图如图6所示。

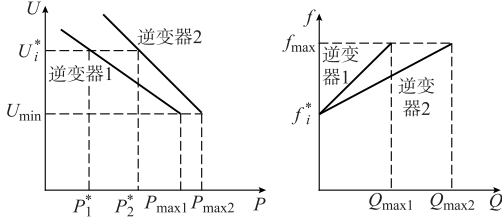


图6 逆变器下垂特性示意图

Fig. 6 Droop characteristic of inverters

不同功率微电源对应的逆变器下垂系数大小不一致,满足

$$\begin{cases} k_{dvi}(P_{\max i} - P_i) = k_{dvj}(P_{\max j} - P_j) \\ k_{dfi}(Q_{\max i} - Q_i) = k_{dfj}(Q_{\max j} - Q_j) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

当微电网处于并网模式时,逆变器实时检测逆变器输出端的电压幅值和频率,来改变电压环的基准幅值和频率基准值,利用式(5)所给的下垂特性来调节逆变器向电网输出的功率。

当微电网处于孤岛运行模式时,微电网中各台分布式电源中的逆变器并联运行。电压环的电压基准幅值和频率基准值为固定值,通过下垂特性的作用,各逆变器根据自身的额定功率,实现对总负载的合理分配。在此模式下,逆变器不再运行在额定工作点,而是下垂特性曲线上的某一点。

2.3 下垂控制存在的问题及解决方法

微电网并网运行时,各逆变器需要检测输出端电压的幅值和频率作为逆变器电压环的幅值基准和频率基准,但是在检测过程中难免出现误差,根据图6所示的下垂特性,逆变器的输出有功功率和无功功率偏离额定工作点,那么有功功率和无功功率就与基准值产生偏差。即使逆变器检测到的电压幅值和频率完全精确,从式(3)可以得到,逆变器输出电压 U_i 要大于母线电压 U 时,才能保证逆变器向母线输出一定的功率。如果 $P_i^* = P_i$,由式(5)可知,则 $U_i = U_i^*$,而根据式(3),则 $P_i = 0$,与假设 $P_i^* = P_i$ 相矛盾,因此必定有 $P_i^* > P_i$ 。

这个问题从本质上来讲,是因为下垂特性相当

于一个比例调节器,而给定功率为直流量,在下垂系数一定时,功率输出与功率基准存在稳态误差。如果增大下垂系数会减小基准与输出的差值,但是系统可能变得不稳定。

为解决这一问题,引入PI调节器微调电压幅值基准和频率基准,使并网运行的微电网在稳态工作时误差为0,即

$$\begin{cases} U_i \approx U_i^* - k_{dvi}(P_i - P_i^*) + \Delta U \\ f_i = f_i^* - k_{dfi}Q_i + \Delta f \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta U &= \left(k_{vsp} + \frac{k_{vsi}}{s} \right) (P_i - P_i^*) \\ \Delta f &= \left(k_{fsp} + \frac{k_{fsi}}{s} \right) Q_i \end{aligned}$$

式中: k_{vsp} 和 k_{vsi} 分别为电压幅值基准微调PI调节器的比例系数和积分系数; k_{fsp} 和 k_{fsi} 分别为频率基准微调PI调节器的比例系数和积分系数。

在微电网孤岛运行时,仍采用式(5)进行控制。微电网中各分布式电源采用自身的信息进行并网运行或孤岛运行,各分布式电源互相独立。微电网中单台逆变器的整体控制框图如图7所示。

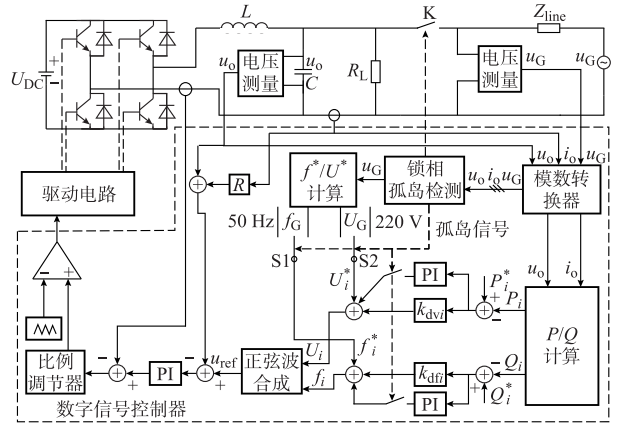


图7 逆变器整体控制策略

Fig. 7 Control strategy diagram of unit inverter

图7中: u_G 为电网电压; U_G 和 f_G 分别为电网电压幅值和频率; S1 和 S2 为单刀双掷开关。在静态开关 K 闭合之前,逆变器需要检测电网是否正常工作。如果电网正常,则首先通过锁相环将逆变器输出电压向电网电压锁相,在相位差小于一定值后,闭合 K,逆变器处于并网运行状态;孤岛检测一旦检测出电网故障,则迅速切断 K,此外将有功环、无功环的PI调节器切除,仅仅采用下垂控制,逆变器处于并联运行状态。

3 仿真验证

根据本文所提方法,利用 MATLAB 7.1 建立了共有 3 台逆变器的微电网系统,微电网中各逆变器的参数见附录 A 表 A1。

微电网处于并网运行模式且未加幅值和频率微调的 PI 调节器时,逆变器输出有功功率、无功功率以及逆变器输出电流波形如图 8 所示。

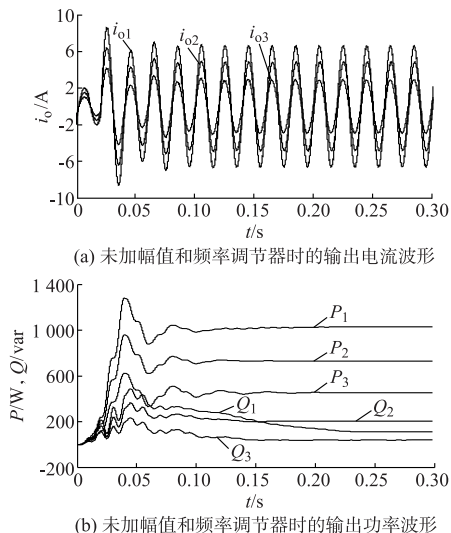


图 8 未加幅值和频率调节器时的逆变器输出波形
Fig. 8 Waveforms of inverters without amplitude and frequency PI regulator

由图 8 可以看出,虽然微电网可以稳定运行,但是单台逆变器的输出功率与附录 A 表 A1 中提供的基准值存在差异,特别是有功功率差异非常大。

采用式(8)控制策略时的波形如图 9 所示。由图 9(a)和图 9(b)可以看出:微电网开始时处于并网运行模式,在 0.4 s 时电网故障,在 0.43 s 时切除频率、幅值微调 PI 调节器;在采用了频率、幅值微调的 PI 调节器以后,系统仍稳定运行,逆变器输出的有功功率和无功功率可以很精确地跟踪各自的额定值;由并网向孤岛切换的过程非常平滑,实现了无缝切换;在孤岛运行时,各逆变器输出功率基本与各自的功率额定值成比例。由图 9(c)和图 9(d)可以看出:稳态时逆变器的频率与电网电压频率保持一致;由于本地负载的功率低于逆变器额定功率,因此在由并网向孤岛切换的过程中,逆变器基准电压的幅值要升高。

微电网在孤岛模式时的波形见附录 A 图 A1。由附录 A 图 A1 可以看出:分别在 0.2 s 和 0.4 s 时使逆变器 3 和逆变器 2 退出微电网,微电网运行稳定;在保证剩余逆变器功率完全供给本地负载的情况下,单台逆变器退出微电网时对微电网影响不大。

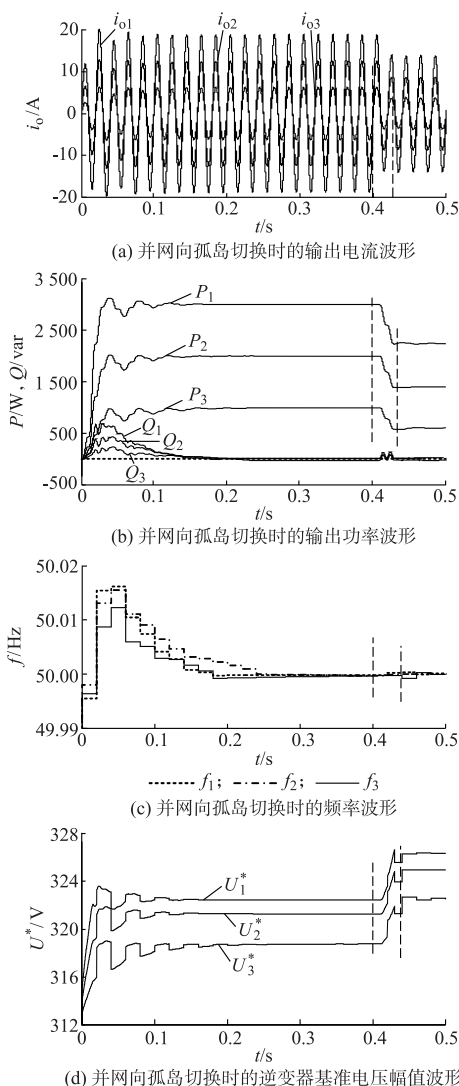


图 9 并网向孤岛切换时的波形
Fig. 9 Waveforms of inverters in grid-connected mode to isolated island mode

4 结语

本文设计了低压微电网中逆变器的控制策略,该控制策略具有以下特点。

- 1) 无需与其他的逆变器进行通信。
- 2) 保证逆变器稳定运行的前提下,较高的电压环积分系数可使采用虚拟阻抗控制策略的逆变器输出阻抗呈阻性。
- 3) 在逆变器输出阻抗和线路阻抗呈阻性时,微电网中逆变器输出的有功功率通过幅值来调节,无功功率通过频率来调节。
- 4) 微电网并网运行且直接采用下垂控制时,逆变器的进网功率与功率额定值存在较大差异。
- 5) 微电网并网运行时,通过增加幅值和频率微调实现有功功率和无功功率的无静差跟踪。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] TIRUMALA R, MOHAN N, HENZE C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes[C]// Proceedings of the 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition: Vol 2, March 10-14, 2002, Dallas, TX, USA: 1081-1086.
- [2] 裴伟, 李澍森, 李惠宇, 等. 微网运行控制的关键技术及其测试平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 94-98.
PEI Wei, LI Shusen, LI Huiyu, et al. Key technology and testbed for microgrid operation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 94-98.
- [3] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [4] 姚志垒, 肖岚, 何流, 等. 带整流性负载并网逆变器的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 80-84.
YAO Zhilei, XIAO Lan, HE Liu, et al. A control strategy for grid-interactive inverters with rectifier loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 80-84.
- [5] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution [C]// Proceedings of IEEE the 35th Annual Power Electronics Specialists Conference: Vol 6, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 4285-4290.
- [6] 袁建华, 高厚磊, 高峰, 等. 两级三相并网逆变器直流链电压间接控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 82-86.
YUAN Jianhua, GAO Houlei, GAO Feng, et al. An indirect DC-link voltage control strategy for two-stage three-phase grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 82-86.
- [7] LI Y, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [8] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726-736.
- [9] AHN S J, PARK J W, MOON S I, et al. Power-sharing method of multiple distributed generators considering control modes and configurations of a microgrid[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 2007-2016.
- [10] BOLLEN M H J, SANNINO A. Voltage control with inverter-based distributed generation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 519-520.
- [11] ENGLER A, SOULTANIS N. Droop control in LV-grids [C]// Proceedings of International Conference on Future Power Systems, November 18, 2005, Amsterdam, Netherlands: 1-6.
- [12] 阙加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互联线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
KAN Jiarong, XIE Shaojun, WU Yunya. Research on decoupling droop characteristic for parallel inverters without control interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 40-45.
- [13] GUERRERO J M, GARCIADEVICUNA L, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [14] 于玮, 徐德鸿. 基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 32-39.
YU Wei, XU Dehong. Control scheme of paralleled UPS system based on output virtual resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 32-39.

吴云亚(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 新能源并网发电技术。

阙加荣(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 逆变器并网及并联控制技术。E-mail: kanjr@163.com

谢少军(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 功率电子变换技术。

Control Strategy Design for Inverters in Low Voltage Microgrids

WU Yunya¹, KAN Jiarong¹, XIE Shaojun²

(1. Department of Experiments, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The line impedance is resistive in low voltage microgrids. In order to ensure that the output impedance matches the line impedance, virtual impedance is introduced to the control strategy for inverters. The impact of integral coefficient voltage loop on output impedance is analyzed. The improvement of voltage loop integral coefficient can make the output impedance become resistive provided that the inverter is in a stable operation state. From the analysis on equivalent circuit of a low voltage microgrid, it is concluded that the active power and reactive power can be changed by adjusting the output voltage amplitude and frequency of the inverter respectively. The impact of parameter examination error on output power of the power inverter is analyzed. The amplitude and frequency proportional-integral (PI) regulators are introduced to droop control strategy, which can realize zero-error tracking of the output power. The simulation results verify that the performance of the proposed control strategy is excellent both in grid-connected mode and islanded mode.

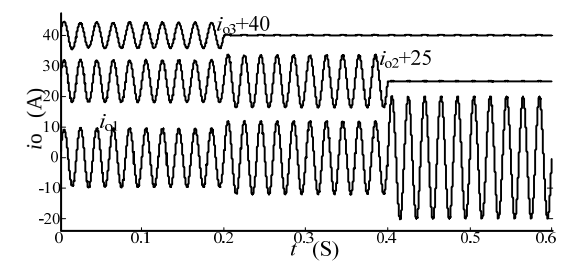
This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077070, No. 51107108).

Key words: low voltage microgrid; inverter; distributed resource; output impedance; line impedance; droop characteristic control

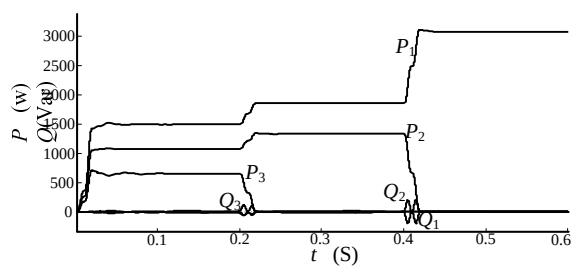
附录 A

表 A1 微电网中各逆变器参数
Tab.A1 Parameters of each inverter in microgrid

	逆变器1	逆变器2	逆变器3
电压环参数(k_v+k_{vi}/S)	1+3000/S	1+3000/S	1+3000/S
电流环参数(k_{ip})	1	1	1
虚拟阻抗(R)	0.3	0.3	0.3
逆变器增益(k_{pwm})	33.3	33.3	33.3
有功额定值(P^*)	3000	2000	1000
无功额定值(Q^*)	0	0	0
有功最大值(P_{max})	5000	3200	1600
无功最大值(Q_{max})	5000	3200	1600
幅值下垂系数(k_u)	0.0015	0.00225	0.0045
频率下垂系数(k_f)	-0.00002	-0.00003	-0.00006
幅值微调参数($k_{up}+k_{ui}/S$)	0.001+0.2/S	0.001+0.2/S	0.001+0.2/S
频率微调参数($k_{fp}+k_{fi}/S$)	$10^{-5}+10^{-4}/S$	$10^{-5}+10^{-4}/S$	$10^{-5}+10^{-4}/S$
线路阻抗(Z_{line})	0.4+j0.06	0.6+j0.09	0.7+j0.1
检测电网频率(f^*)	50.04	50.04	50.04
检测电网有效值(U^*)	220	220	220



(a) 孤岛运行时电流波形



(b) 孤岛运行时功率波形

图 A1 孤岛运行时波形
Fig.A1 Waveforms of inverters in islanded mode