

微网孤岛运行条件下基于导纳域的稳定性研究

姜世公,王 卫,刘桂花,徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:通过分析电压源型逆变器的拓扑结构和控制策略,建立了逆变器输出阻抗模型。结合阻抗分析方法分析了逆变器中滤波器参数和控制环路增益对其输出阻抗、逆变系统等效环路增益及稳定性的影响规律,并采用时域分析方法验证了相关分析的正确性。基于微网孤岛运行时多逆变器并联的特点,提出了一种导纳域的稳定性判断方法,给出了逆变器输出导纳和负载输入导纳之间量化的稳定性判断条件,通过合理设计微源输出导纳以保证微网系统的稳定性。仿真和实验结果验证了所提方法的正确性和可行性。

关键词:微网;稳定性;输出阻抗;导纳域;逆变器;模型

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.004

0 引言

随着传统的煤、石油等化石能源逐渐走向枯竭,提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的利用成为解决能源需求增长与能源短缺以及能源利用与环境保护等矛盾的重要途径^[1-3]。因此,具有投资少、损耗低、可靠性高等优点的分布式发电技术获得了越来越多的重视和应用^[4-7]。将分布式发电系统以微网的形式接入大电网,与大电网互为支撑,或独立运行为本地负载提供能量是最能有效发挥分布式发电系统优势的方式^[8-12]。微网是由分布式发电单元、储能单元、负载及监控和保护装置等组成的一个能够实现自我控制、保护和管理的发配电系统。

通常,微网中的分布式电源通过逆变器并联连接到交流母线为负载提供能量。由于微网孤岛运行时逆变器大多采用电压控制模式,输出阻抗非常小,一旦各分布式发电单元的输出电压不一致将会在各单元之间产生环流,导致逆变器工作异常甚至烧毁器件。因此,有必要合理设计控制策略以保证各分布式发电单元的输出电压幅值、频率和相位保持一致。下垂控制^[13-16]利用接口逆变器 P - f 、 Q - U 之间的近似线性关系控制输出电压的频率和幅值。由于其只需检测逆变器自身信息,无需互联线与其他逆变器进行信息交换,提高了系统的冗余性和可靠性。

微网系统是由多种分布式发电单元和不同类型负载组成的一个复杂系统,通常针对各微源的底层逆变器进行设计,以保证其稳定可靠运行。但随着微网系统中不同类型负载的加入,各子系统之间的相互作用会导致微网系统性能退化甚至出现不稳定的情况。

1976 年 Middlebrook 提出的阻抗分析方法^[17]被广泛用于分析系统的小信号稳定性,并指出了级联系统的稳定性判断条件及相应的禁止区,但是由于该阻抗判断条件过于严格,使得整个系统的设计过于保守。Fred C. Lee 和 S. D. Sudhoff 等人又分别提出了改进的系统小信号稳定性判断条件并且定义了相应的禁止区^[18-21]。但上述分析方法都是在源变换器和负载各自稳定的前提下,当源变换器输出阻抗不变时,针对不同的负载进行设计以保证级联系统稳定性。

本文从实际应用角度出发,建立了基于电压电流双闭环控制的电压源型逆变器的开环传递函数和输出阻抗模型。根据所建立的模型分析了系统的相对稳定性,以及逆变器中不同参数对逆变系统稳定性的影响。提出了一种适用于微网系统的稳定性导纳分析方法,定义了保证微网系统稳定性的分布式发电单元输出阻抗域条件,并给出了该方法的理论证明。基于该方法可以通过合理设计微网系统中不同微源逆变器的输出导纳以保证微网系统的稳定性,降低了系统设计难度,提高了微网运行可靠性。文中给出了该方法的幅值条件和相角条件及对应的禁止区。

1 分布式发电单元输出阻抗模型

分布式发电单元是微网的重要组成部分,而逆变器又是分布式发电单元的核心。建立精确的逆变器输出阻抗数学模型对于分析微网系统稳定性具有重要意义。

典型单相电压源型逆变器如图 1 所示,主要包括一个直流电源、一个桥式 PWM 逆变器和一个 LC 滤波器,桥式逆变器根据调制信号将直流输入斩波成为一组脉宽调制脉冲,其控制方式采用电压电流双闭环控制。其中, U_{in} 为输入电压, V_{T1} 、 V_{T2} 、 V_{T3} 、 V_{T4} 为全桥电路的 4 个开关管, L 为滤波电感, C 为滤波电容, R_f 为滤波电感及线路等效寄生电阻, R_{load} 为交流负载,

收稿日期:2012-08-19;修回日期:2013-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077017);CAST 基金资助项目(Cast201219)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077017) and CAST Foundation(Cast201219)

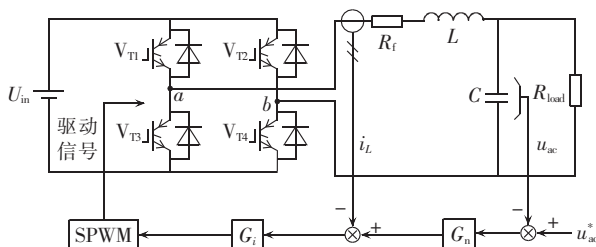


图 1 逆变器结构框图

Fig.1 Block diagram of inverter structure

u_{ac}^* 为输出电压给定信号, u_{ac} 为交流输出电压, i_L 为电感电流, G_n 为电压外环调节器增益, G_i 为电流内环调节器增益。外部电压反馈环用来控制输出电压, 内部电感电流反馈环用以提高系统的动态性能。

由于全桥电路的开关频率通常远高于输出电压的基波频率, 故开关动态过程可以忽略。因此, 可以用一个简单的增益单元代表逆变桥, 其增益 M 可以表示为:

$$M = \frac{U_{in}}{U_{tri}} \quad (1)$$

其中, U_{tri} 为三角载波峰值。

图 2 为图 1 所示逆变器的线性模型。

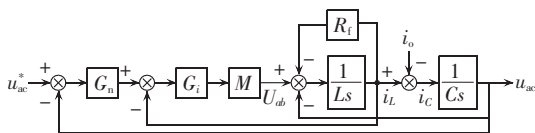


图 2 基于双环控制的逆变器线性模型

Fig.2 Linear model of inverter based on dual-loop control

依照图 2 可得:

$$\begin{cases} (U_{ab} - u_{ac} - i_L R_f) \frac{1}{L_s} = i_L \\ i_L - i_o = i_C \\ i_C \frac{1}{C_s} = u_{ac} \end{cases} \quad (2)$$

其中, i_o 和 i_C 分别为逆变器输出电流和滤波电容电流。

系统电压外环闭环传递函数 $G_c(s)$ 为:

$$G_c(s) = \frac{u_{ac}}{u_{ac}^*} = \frac{G_i G_n M}{1 + C_s(R_f + L_s) + G_i M C_s + G_i G_n M} \quad (3)$$

由于系统反馈增益为 1, 开环传递函数 $G_o(s)$ 为:

$$G_o(s) = \frac{G_i G_n M}{1 + C_s(R_f + L_s) + G_i M C_s} \quad (4)$$

系统输出阻抗可以表示为:

$$Z_o = \frac{L_s + R_f + G_i M}{L C_s^2 + (R_f C + G_i M C)s + G_n G_i M + 1} \quad (5)$$

通过上述建立的开环传递函数模型, 可以对典型双闭环逆变器的相对稳定性进行分析。根据式(4), 逆变器开环频率特性如图 3 所示。

由图 3 可知系统增益裕度 $G_M = 80.3$ dB, 相角裕度 $\theta_M = 65.6^\circ$, 因此文中所设计的逆变器是一个相对稳定系统。其中, 相关参数如下: $L = 1.2$ mH, $C = 4.7$ μ F, $R_f =$

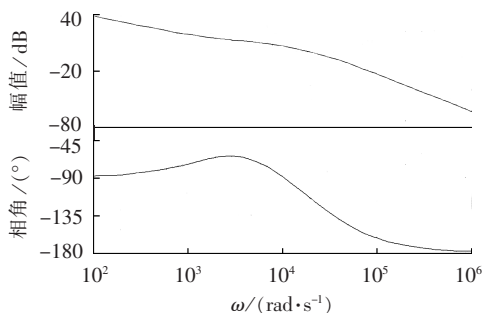


图 3 逆变器开环频率特性

Fig.3 Open-loop frequency characteristic of inverter

2 mΩ, $M = 100$, $G_n = (0.1s + 200)/s$, $G_i = (0.4s + 0.005)/s$ 。

2 逆变系统阻抗稳定性分析方法

2.1 阻抗稳定性判断方法

由 Middlebrook 提出的阻抗分析方法被广泛地应用在系统稳定性判断中, 其优点是可以通过研究子系统输入输出特性的方式分析系统的稳定性, 无需知道每个子系统的内部详细参数。假设源变换器和负载都是理想子系统, 并可独立稳定工作, 则当 2 个系统级联后其总体的系统闭环传递函数可以表示为:

$$G(s) = \frac{G_1 G_2}{1 + Z_o / Z_{in}} = \frac{G_1 G_2}{1 + T_m} \quad (6)$$

$$T_m = \frac{Z_o}{Z_{in}} \quad (7)$$

其中, Z_o 为源变换器输出阻抗; Z_{in} 为负载输入阻抗; T_m 为等效环路增益, 定义为源变换器输出阻抗与负载输入阻抗之比。

上述系统稳定条件为: 在全频率范围内, 假设源变换器和负载 2 个子系统均能够稳定地独立工作, 源变换器的输出阻抗要远小于负载输入阻抗, 即:

$$|T_m| \ll 1 \quad (8)$$

然而, 要满足式(8)所提出的条件, 会使得逆变系统设计过于保守。因此, Fred C. Lee 等人又提出了改进的系统稳定性阻抗判断标准, 可以表示为:

$$\begin{cases} |Z_o| + G_M < |Z_{in}| \\ -180^\circ + \theta_M < \angle Z_o - \angle Z_{in} < 180^\circ - \theta_M \end{cases} \quad (9)$$

假设变换器输出阻抗不变, 当负载输入阻抗幅值满足式(9)中第 1 个公式时, 其相角条件不需要满足第 2 个公式即可保证系统稳定, 但当负载输入阻抗不满足第 1 个公式时, 其相角条件需满足第 2 个公式以保证系统稳定。与其对应的禁止区条件可以表示为图 4, 即系统等效环路增益 T_m 的奈奎斯特曲线不进入禁止区, 则此系统是一个稳定的系统。

2.2 基于阻抗判断标准的逆变器优化方法

以往基于阻抗判断准则的设计方法多用于在源变换器的等效输出阻抗不变的条件下, 对负载输入阻抗进行设计, 以保证系统的稳定性。本文与此不同之

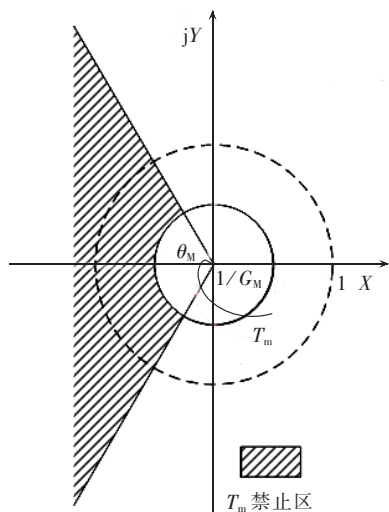


图 4 系统禁止区判断条件

Fig.4 Criterion of system exclusive area

处在于,在逆变系统的设计过程中,重点是对源逆变器进行设计,以保证整个系统运行过程中具有足够的稳定裕度。本文以图 1 所示逆变系统为例,假设负载输入阻抗不变,根据式(5)中建立的逆变器输出阻抗模型和负载输入阻抗之间的匹配关系进行分析,根据式(9)中的稳定性判断条件合理设计逆变器输出阻抗,分析输出源逆变器的各电气参数和环路增益对系统稳定性的影响。

由式(5)可以看出,源逆变器的输出阻抗主要受滤波器参数、电压环增益和电流环增益的影响。下面详细分析滤波电感 L 对逆变器输出阻抗以及对系统稳定性的影响。并参照同样的方法对其他参数的影响进行分析,给出了详细的分析结果。

图 5 为逆变器输出阻抗随滤波电感 L 变化的频率特性。由图 5 可知,随着滤波电感 L 逐渐增加,逆变器输出阻抗 Z_o 逐渐增加并接近负载输入阻抗 Z_m ,系统稳定性逐渐降低。

通过分析系统的等效环路增益 T_m 可以更加直观地对系统的稳定性进行分析。图 6 为系统等效环路增益 T_m 的频率特性随滤波电感 L 变化曲线。其中负载输入阻抗为: $Z_m = X + jY = 48.4 + j31.4 \Omega$ 。由图

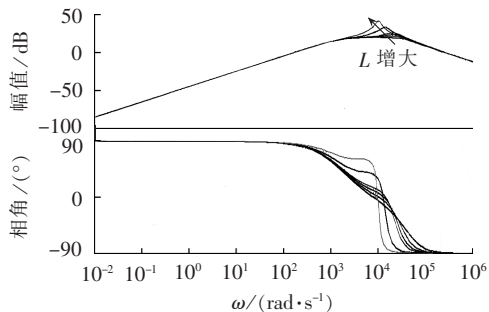


图 5 逆变器输出阻抗随 L 变化的频率特性

Fig.5 Frequency characteristic of inverter output impedance varying with L

6 可知,随着滤波电感参数取值的逐渐增加,系统等效环路增益 T_m 逐渐增大。根据式(9),系统中逆变器输出阻抗要小于负载输入阻抗,即 T_m 的幅频特性小于零时,系统可以稳定运行。但随着 T_m 逐渐增大,系统的稳定性能逐渐降低。如果 T_m 的幅频特性穿越 0 dB 线,则系统的稳定性需要通过式(9)中相角约束条件进行判断,若 T_m 的相频特性满足约束条件,则系统稳定,否则不稳定。

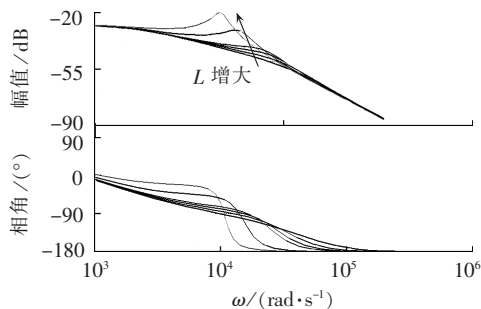


图 6 等效环路增益 T_m 随 L 变换的频率特性

Fig.6 Frequency characteristic of equivalent loop gain T_m varying with L

由式(6)中给出的级联系统闭环传递函数可知,其特征方程可以表示为:

$$1 + T_m = 0 \quad (10)$$

图 7 为文中逆变系统的特征方程的根随滤波电感 L 参数取值变化的分布。可知,随着 L 取值的增大,逆变系统特征方程的根逐渐右移,导致系统的稳定性降低。

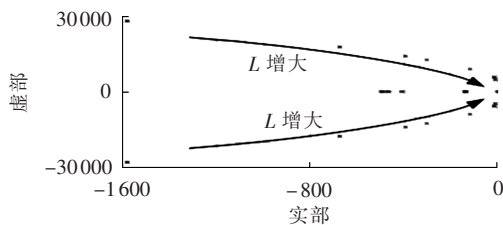


图 7 特征方程根随 L 变化的分布

Fig.7 Distribution of characteristic equation root varying with L

滤波电容参数对逆变系统稳定性的影响同样可以通过分析逆变器等效输出阻抗和负载输入阻抗之间的匹配关系进行分析。随着滤波电容参数取值的增大,逆变系统等效环路增益 T_m 的幅频特性逐渐增大靠近 0 dB 线,其极点逐渐右移靠近虚轴,系统稳定性降低。随着电容取值进一步加大,逆变系统特征方程出现正实部根,系统不稳定。所以在滤波电容参数选取过程中,需考虑其对系统稳定性的影响。

系统中控制环路的增益也会对系统的稳定性造成影响,对于图 1 所示的电压电流双环控制策略,电压外环比例和积分系数增大时等效环路增益 T_m 逐渐减小,系统特征方程的根远离虚轴,系统稳定性及

响应速度增加;而电流内环中比例系数较小时,等效环路增益 T_m 系统存在共轭极点并随比例系数的增大逐渐远离虚轴,系统稳定性增加,当比例系数进一步增大时,等效环路增益 T_m 的极点分布在负实轴上,系统稳定且单调无振荡。电流内环中积分系数变化时, T_m 的零极点和系统特征方程根的分布变化很小,可见电流内环中积分系数变化对系统稳定性影响较小。

通过上面的分析结合系统时域分析方法可以验证,在逆变系统的设计过程中,已知负载输入阻抗的条件下,采用阻抗分析方法对逆变器输出阻抗进行优化设计,可以有效地保证逆变系统的小信号稳定性。

3 微网系统稳定性导纳域判断方法

微网作为包含多种分布式发电单元、储能单元、负载等装置的自治发电系统,其接口逆变器多采用对等控制以提高微网的冗余性和可靠性。其中,下垂控制方法被广泛应用于实现多台逆变器并联,保障各接口逆变器输出的电压和频率平衡,减小各台逆变器间环流,保证功率均分,提高微网系统的电能质量及供电可靠性。

以往对于微网系统稳定性的分析,大多是针对其底层逆变器展开研究,而对于逆变器与微网系统的稳定性之间联系的分析较少。本文提出了一种基于逆变器输出导纳域的微网系统稳定性判断方法,该方法通过对底层逆变器的输出导纳进行设计以保证整个系统的稳定性。

假设微网系统由 n 台图 1 中所示的逆变器并联组成,并通过下垂控制消除了各台逆变器间的环流影响,忽略其他损耗,系统中存在如下关系:

$$P_{S1} + P_{S2} + \dots + P_{Sn} = P_{load} \quad (11)$$

其中, P_{S1} 、 P_{S2} 、 $\dots$ 、 P_{Sn} 为各台逆变器发出的功率, P_{load} 为负载消耗功率。

由式(6)可知,对于单逆变源系统有:

$$G(s) = \frac{G_1 G_2}{1 + Z_o / Z_{in}} = \frac{G_1 G_2 \frac{Y_o}{Y_{in}}}{1 + \frac{Y_o}{Y_{in}}} \quad (12)$$

其中, Y_o 为逆变器等效输出导纳, Y_{in} 为负载输入导纳。

对于微网系统,定义:

$$K_m = \frac{Y'_o}{Y_{in}} = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{oj}}{Y_{in}} \quad (13)$$

其中, Y'_o 为微网系统中多台逆变器并联等效输出导纳, Y_{oj} 为微网系统中第 j 台逆变器等效输出导纳。

由文献[21]可知,若保证多并联系统稳定,且系统稳定裕度 $G_m > 1$, K_m 需满足如下关系:

$$\left| \frac{1}{K_m} \right| = \left| \frac{Z'_o}{Z_{in}} \right| \leq \frac{1}{G_m} \quad (14)$$

其中, Z'_o 为微网系统中多台逆变器并联等效输出阻抗, Z_{in} 为负载输入阻抗。

根据微网系统并联运行及其控制特点,需合理设计其等效输出阻抗以满足式(14)中的阻抗比条件。考虑到微网系统结构较为复杂,建立其等效输出阻抗模型难度很大,本文设计了一种基于分布式发电单元输出导纳域的稳定性分析方法。假设各分布式发电单元接口逆变器的等效输出导纳满足式(15)所提条件,则并联系统即可满足式(14)中所定义的系统阻抗稳定性条件,进而保证微网系统的稳定性及稳定裕度。

$$\operatorname{Re} \left(\frac{Y_{oj}}{Y_{in}} \right) \leq -G_m \frac{P_{Sj}}{P_{load}} \quad (15)$$

为验证本文所提分析方法的正确性,下面对其进行证明。若系统各分布式发电单元满足式(15)设立条件,则有:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(K_m) &= \operatorname{Re} \left(\frac{Y'_o}{Y_{in}} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{\sum_{j=1}^n Y_{oj}}{Y_{in}} \right) = \\ &\sum_{j=1}^n \operatorname{Re} \left(\frac{Y_{oj}}{Y_{in}} \right) \leq -G_m \sum_{j=1}^n \frac{P_{Sj}}{P_{load}} \end{aligned} \quad (16)$$

由式(11)和(16)可得:

$$\operatorname{Re}(K_m) \leq -G_m \quad (17)$$

因此,存在式(18)所示关系:

$$|K_m| \geq G_m \quad (18)$$

进而可知,微网系统中分布式发电单元输出导纳和负载输入导纳满足式(14),验证了文中提出的系统稳定性导纳判断方法的正确性。由式(15)可知微网系统稳定性禁止区条件如图 8 所示,其相角条件需满足:

$$-180^\circ + \theta < \angle Y_{oj} - \angle Y_{in} < 180^\circ - \theta \quad (19)$$

其中, $\theta = \arccos \left| G_m \frac{P_{Sj} Y_{in}}{P_{load} Y_{oj}} \right|$, 且在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化。

通过上面的分析可知,在逆变器设计过程中需满足式(15)和式(19)中提出的关系以保证微网系统的

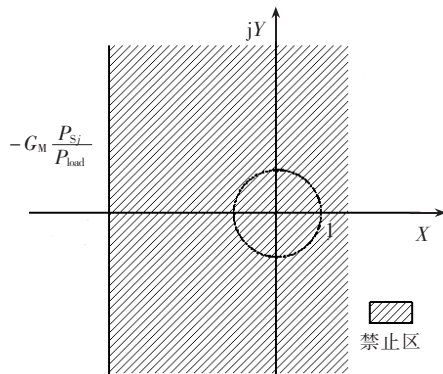


图 8 微网系统逆变器导纳禁止区

Fig.8 Admittance exclusive area of inverter in microgrid system

稳定性要求。

图 9 为滤波电感取值不同时 K_m 的频率特性,由图 9 可知,当 L 取值增大后, K_m 在开关频率处幅频特性降低且靠近 0 dB 线, $|K_m|$ 逐渐减小进而导致系统无法满足式(15)条件,系统稳定性变差。

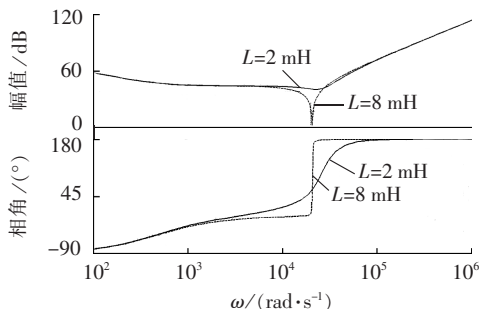


图 9 不同输出导纳时对应 K_m 的奈氏曲线

Fig.9 Nyquist curve corresponding to K_m for different output admittances

图 10 为逆变系统滤波电感取值不同时系统单位阶跃响应对比,以衡量不同输出导纳条件下逆变系统的动态特性。参照图 9 中滤波电感参数变化,当 L 由 2 mH 增大到 8 mH 后,系统单位阶跃响应超调明显增大,调整时间增加,响应速度变慢,系统动态性能变差。

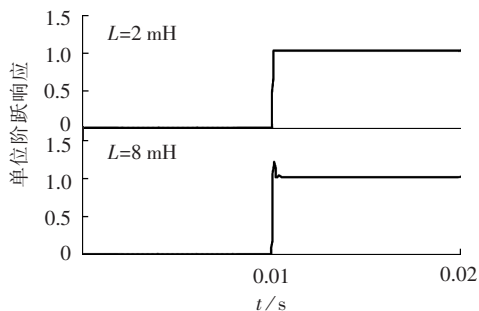


图 10 滤波电感取值不同时系统单位阶跃响应对比

Fig.10 Comparison of system response to unit step change for different filter inductances

图 11 为电压环比例系数 k_p 取值不同时系统单位阶跃响应对比。由图 11 可知,当电压环比例系数增大后系统等效环路增益 T_m 逐渐减小,阶跃响应超

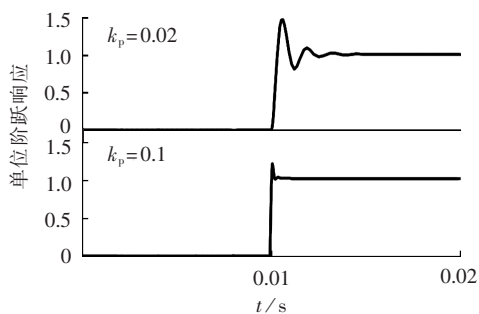


图 11 电压环参数取值不同时系统单位阶跃响应对比

Fig.11 Comparison of system response to unit step change for different voltage loop parameters

调减小,响应速度增加,系统动态性能得到了改善。其他参数影响的对比分析与此方法类似,在此不再赘述,仿真结果也验证了本文第 2 节分析的正确性。

为验证所提出控制方法的正确性,本文搭建了一套 800 W 实验平台,逆变器输入电压为 400 V,输出交流电压为 220 V(频率为 50 Hz),其他参数与图 1 中相同。图 12 给出了滤波电感分别为 2 mH 和 8 mH 时逆变器输出电压波形,可以看出当逆变器滤波电感增大时,其输出导纳减小,系统稳定裕度降低,稳定性变差,这与前面分析结论一致。

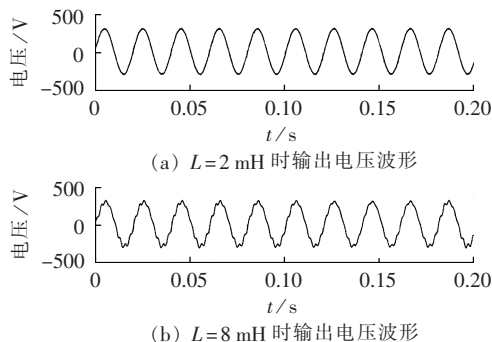


图 12 采用不同滤波电感时输出电压波形对比

Fig.12 Comparison of output voltage for different filter inductances

在分析微网系统的配置结构和控制方法的基础上,设计了基于下垂控制的 2 台并联 1 kW 分布式发电单元组成的微网仿真平台以验证本文所提出的导纳稳定性分析方法,每台逆变器的滤波参数及环路增益与图 1 所示逆变器模型参数相同。图 13 所示波形分别为交流母线电压 u_{load} 、微网输出电流 i_{load} 和输出频

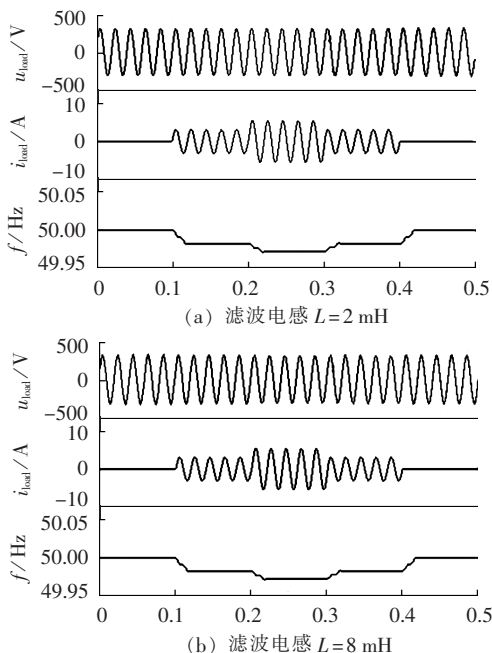


图 13 2 台并联分布式发电单元组成的微网

Fig.13 Microgrid composed of two parallel distributed generation units

率 f 。由仿真结果可知,当各逆变器滤波电感为8 mH时,输出电压谐波增加,系统输出电能质量变差。

图13所示系统0~0.1 s工作在空载状态,0.1~0.2 s工作在半载状态,0.2~0.3 s工作在满载状态,0.3~0.4 s工作在半载状态,0.4~0.5 s工作在空载状态。通过分析可知,当各逆变器滤波电感 L 减小到2 mH时,逆变器输出导纳增大,各逆变器并联后系统稳定裕度增大,这样可以保证系统具有较好的动态和稳态运行特性,同时也验证了文中所提出方法的正确性。

4 结论

本文在分析了孤岛运行条件下微网系统及其底层分布式发电单元特点的基础上,采用阻抗匹配关系对分布式发电单元的输出阻抗进行优化设计以提高系统的稳定性。主要结论如下:

a. 根据微网中分布式发电单元的拓扑结构及控制策略特点,建立了基于电压电流双闭环控制的全桥逆变器输出阻抗模型,并对其稳定性进行分析;

b. 基于所建立模型,分析了源逆变器中滤波参数及各环路增益对系统输出阻抗及稳定性的影响,通过时域分析方法证明了该方法的正确性;

c. 基于微网系统中多逆变器并联的特点,结合阻抗分析方法,提出了一种适用于微网系统导纳稳定性的分析方法,给出了系统稳定的导纳域及相角稳定条件。利用此方法通过合理设计微网系统中各分布式发电单元输出导纳与负载输入导纳比满足文中定义的稳定条件以保证整个微网系统的稳定性。

该方法极大降低了系统设计难度,提高了系统的可靠性,仿真和实验结果证明了文中所提方法的正确性。

参考文献:

- [1] 刘鸿鹏,王卫,吴辉. 光伏逆变器的调制方式分析与直流分量抑制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(9):27-32.
LIU Hongpeng,WANG Wei,WU Hui. Modulation mode analysis and suppressing DC current of PV inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(9):27-32.
- [2] MIRBACH T,OHREN S,SCHILD S,et al. Impact of a significant share of renewable energies on the European power generation system[C]//7th International Conference on the European Energy Market. Crete,Greece:[s.n.],2010:1-6.
- [3] DING Jinxu,SOMANI A. A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy [C]//2010 IEEE Green Technologies Conference. Dallas,USA:[s.n.],2010:1-10.
- [4] 郑漳华,艾芊,顾承红,等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):23-29.
ZHENG Zhanghua,AI Qian,GU Chenghong,et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental

- factor[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(13):23-29.
- [5] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.
- [6] SOTKIEWICZ P M,VIGNOLO J M. Allocation of fixed costs in distribution networks with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):639-652.
- [7] SENJYU T,MIYAZATO Y,YONA A,et al. Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):1236-1242.
- [8] 李福东,吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):18-25.
LI Fudong,WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13):18-25.
- [9] LIANG Tao,SCHWAEGERL C,NARAYANAN S,et al. From laboratory microgrid to real markets-challenges and opportunities [C]//8th International Conference on Power Electronics and ECCE. Jeju,Korea:[s.n.],2011:264-271.
- [10] JEON Jinhong,KIM Jongyul,KIM Hakman,et al. Development of hardware in-the-loop simulation system for testing operation and control functions of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(12):2919-2929.
- [11] LI Yunwei,VILATHGAMUWA D M,LOH P C. Design,analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(5):1195-1204.
- [12] KANCHEV H,DI L,COLAS F,et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(10):4583-4592.
- [13] 张尧,马皓,雷彪,等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):42-48.
ZHANG Yao,MA Hao,LEI Biao,et al. Analysis of dynamic performance for parallel operation of inverters without wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(3):42-48.
- [14] 林新春,段善旭,康勇,等. 基于下垂特性控制的无互联线并联UPS建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):33-38.
LIN Xinchun,DUAN Shanxu,KANG Yong,et al. Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):33-38.
- [15] KIM Jaehong,GUERRERO J M,RODRIGUEZ P. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):689-701.
- [16] MAJUMDER R,LEDWICH G,GHOSH A,et al. Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2768-2778.
- [17] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations design and application of switching regulators[C]//Proc IEEE Industrial

Application Society Annual Meeting, Chicago, USA: [s.n.], 1976: 91-107.

[18] WILDRICK C M, LEE F C. A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(3): 280-285.

[19] FENG Xiaogang, YE Zhihong, XING Kun, et al. Individual load impedance specification for a stable DC distributed power system[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, USA: [s.n.], 1999: 923-929.

[20] LIU Jinjun, FENG Xiaogang, LEE F C, et al. Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1254-1261.

[21] SUDHOFF S D, GLOVER S F, LAMM P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 965-973.

作者简介:
姜世公(1983-),男,黑龙江鸡西人,博士研究生,研究方向为分布式发电技术、微电网技术等(E-mail:jiangshigong602@yahoo.cn);
王卫(1963-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向为分布式发电技术、智能电网、照明电子技术、软开关变换技术等。

Admittance specification stability of islanded microgrid

JIANG Shigong, WANG Wei, LIU Guihua, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The output impedance model of voltage-source inverter is established based on the analysis of its topology and control strategy. The influence of its filter parameters and control loop gain on its output impedance, equivalent loop gain and system stability is analyzed by the impedance analysis method, the correctness of which is verified by the time-domain analysis method. Since the multiple inverters of islanded microgrid are connected in parallel, a method to judge the stability of admittance domain is proposed and the quantized criterion of stability between inverter output admittance and load input admittance is given. The system stability of microgrid can be ensured by the proper design of micro-source output admittance. Simulative and experimental results demonstrate the correctness and feasibility of the proposed method.

Key words: microgrid; stability; output impedance; admittance specification; electric inverters; models

(上接第 18 页 continued from page 18)

Wide-area damping robust control based on non-convex stable region

MA Jing, WANG Tong, WANG Zengping, YANG Qixun

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

Abstract: Based on the theory of Lyapunov and due to the characteristics of inter-area oscillation mode: low-frequency, low damping and long duration, the theory of Gutman is used to extend the stability region for redefining a non-convex stable region to quickly promote the system to stable state. The eigenvalue shift factor is applied to convert the nonlinear non-convex region into a feasible linear space. With the consideration of the uncertainties of system and disturbance, the constraints of hybrid H_2/H_∞ multi-objective robust control are reformed based on the non-convex stable region and transformed into a series of linear inequality set, which are optimized to obtain the feedback control vectors. Time-domain and frequency-domain simulations are respectively carried out for a 4-machine 2-area system under different operating conditions, and results show that, the proposed control strategy is superior to traditional H_2/H_∞ control strategy in damping performance and robustness.

Key words: electric power systems; inter-area oscillation; non-convex stable region; eigenvalue shift factor; damping; robust control; stability