

适于单相微电网应用的并网接口系统

张巍¹,汪飞¹,阮毅¹,赵春江²,许德志¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 上海电力学院 太阳能研究所, 上海 200090)

摘要: 提出了一种适用于单相微电网系统且具备高质量供电电压的并网接口系统。在传统串-并结构拓扑基础上,考虑光伏发电等新能源及其系统的接入,延伸出一组可连接微电网与其他电网的网侧接口系统拓扑。不同于传统功能分配,将并网接口系统中串联变换器配置为功率流的双向控制,同时承担电能质量问题的相互隔离作用;将并联变换器配置为电压工作模式,为本地提供高质量的供电电压,同时利用比例谐振控制器和分裂电容法等技术优化并简化了控制系统的设计,使整体系统性能较之传统串-并架构得以改善。在各种电压扰动情况下,系统可保持当地电网和公共电网之间的功率传输,并为本地负载高质量供电。最后结合一套具体实验系统详述了所提概念并验证了其正确性。

关键词: 微电网; 并网; 接口; 可再生能源; 分布式发电; 电压扰动; 变换器; 控制

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.006

0 引言

不同于传统化石燃料发电,可再生能源发电具有用之不竭、清洁无污染等诸多优点,已经成为电力系统能源的重要组成部分。并网逆变器作为分布式发电系统与电网之间的关键接口设备,其性能决定着并网电能质量,已经成为国内外研究的热点。然而,随着分布式发电单元的不断渗透,电网将日益复杂,只有对分布式发电单元进行良好的设计和和管理,电网才不会产生供电质量问题^[1-5]。

近年相关文献中已经提出电力电子变换器在用作新能源发电并网接口的同时亦可引入改善电能质量的设计,诸如有源电力滤波、电压不平衡补偿、网侧电压支持等辅助功能^[6-10]。然而,仅仅独立地研究单个分布式发电单元的并网技术是不够的,一方面由于独立单元的功率容量有限,另一方面完全的分布式架构不利于管理和控制。所以,从一定的电网规模角度出发进行研究具有实际意义,而最基本的研究对象应是微电网层面。

微电网将本地发电和用电负载视为子系统。在其技术发展过程中,多个分布式发电单元的并联功率共享控制得到了较多的研究和发展^[11-13]。在并联功率共享控制中,过大的下垂增益变化或参考功率的变化会引起微电网系统的不稳定^[14-15]。通过引入通信技术,例如控制现场网络或电力线通信,控制器的

参数可以灵活地根据负载、传输线阻抗及网络参数的变换等信息进行调整,以实现大规模微电网内稳定而精确的功率共享控制^[16-17]。

当前大容量的分布式发电系统或微电网仍处于应用初期,微电网和其他电网的接口方式与控制策略仍缺乏充分的研究与突破。

因此,本文聚焦于并网接口架构的研究,所设计的系统应该能够在电网扰动的情况下保持微电网和所并联电网的功率传输,同时在用户侧和电网侧都能尽力改善电能质量。

从未来并网接口架构的思考出发,本文以传统的串-并拓扑结构为基础,构建了一种并网接口变换器系统。通过系统功能的重新配置,可以实现控制系统设计的简化和整体系统性能的改善。本文最后结合一套具体实验系统详述了所提出的系统概念并验证了其合理性。

1 并网接口系统结构及其功能

1.1 基于串-并结构的并网接口系统

图 1 是一个微电网和公共电网的并网接口系统

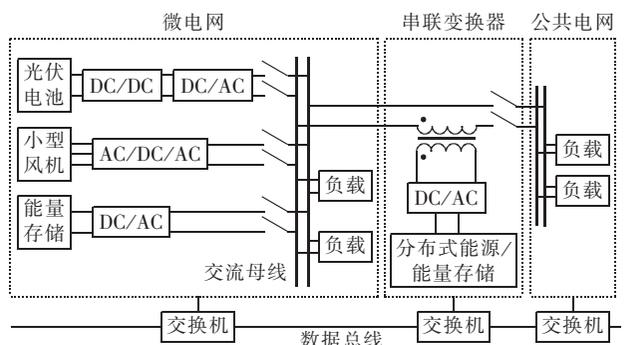


图 1 微电网和公共电网的并网接口系统示例

Fig.1 Grid-interfacing system between microgrid and grid

收稿日期:2014-02-20;修回日期:2014-09-04

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51107078);台达环境与教育基金会资助项目(DREG2012006);上海市浦江人才计划资助项目(11PJ1403800)

Project supported by the National Natural Science Youth Foundation of China(51107078),Delta Environmental & Educational Foundation Plan(DREG2012006) and Shanghai Pujiang Talents Project(11PJ1403800)

示例。图中,左侧是由多个分布式发电系统、能量存储以及本地负载构建的一个微电网;中间的双向串联变换器用于连接微电网和公共电网以便功率交换,同时隔离电网之间的电能质量问题。数据总线用于电网层面的信息采集与交换及指令传送等。

图 2 为一个串联变换器和一个并联变换器构成的串-并型通用结构。

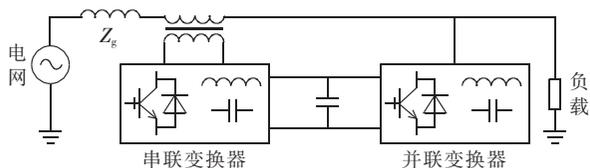


图 2 串-并结构单线图

Fig.2 Single-line diagram of conventional serial-parallel structure

传统的串-并结构在电力系统中通常用于三相系统中,而本文从分布式微电网考虑将主要关注串-并结构在单相系统中的应用。通过将图 2 中的基本结构与分布式能源和能量存储进行结合与再配置,可以适用于分布式发电系统。几种并网接口系统如图 3 所示。图 3(a)为一种最简单和基本的结构,其中由一组分布式能源进行直流供电。根据文献[18],类似的结构已经应用于在线交互式不间断电源系统或分布式发电系统。

此外,文献[19]中通过选用隔离型 DC/DC 变换器技术,使得串联和并联变换器可以在直流侧得以隔离,如图 3(b)所示。因此,可以省去昂贵和笨重的隔离变压器。串联和并联变换器也可分别由独立的分布式能源供电,如图 3(c)所示。

串-并拓扑中多个变换器可并联从而构建一个微电网。此时串联变换器可以被视作连接微电网至

公共电网或者连接 2 个微电网的接口变换器,用于功率流控制和故障保护。图 3(d)为一个微电网和公共电网的串-并接口系统示例。

1.2 系统功能配置

图 3 所述几种用于微电网的并网接口系统,因为串联和并联变换器带来的多控制自由度,能够根据需要进行不同的控制功能。传统串-并结构的控制方案中,串联部分工作在电压控制模式,用于补偿电网端电压扰动以保证用户端的电压稳定,并联部分工作在电流控制模式用于补偿负载端的谐波电流或无功电流以实现高功率因数。然而本文所提出的并网接口系统,其并联变换器工作在电压控制模式提供当地高质量供电电压,而串联变换器进行功率流的双向控制和电能质量问题的相互隔离。通过这样的功能配置,从电网层面看微电网就如同一个分布式发电的负载或供电单元,而其内部的能量控制管理则自成体系。其并网端口处则由串联变换器进行潮流控制和电能质量改善。

图 4 给出了所采用系统的电路符号表征,其中下标“1”代表基波,“h”代表谐波,“g”代表电网,“s”代表串联变换器,“p”代表并联变换器,“Ld”代表负载。

虽然公共电网和当地电网的功率传输取决于串联变换器的控制,但是传输功率的参考指令必须基于本地系统的功率容量和分布式电网的功率需求决定。因此数据通信对于并网接口变换器系统而言至关重要,它用于采集和传输实时用户与电网运营商的数据信息[20]。然而,网络层面的通信和实时参考信号的计算超出了本文的研究内容,下文仅研究该系统的底层电力电子变换器的控制与实现。

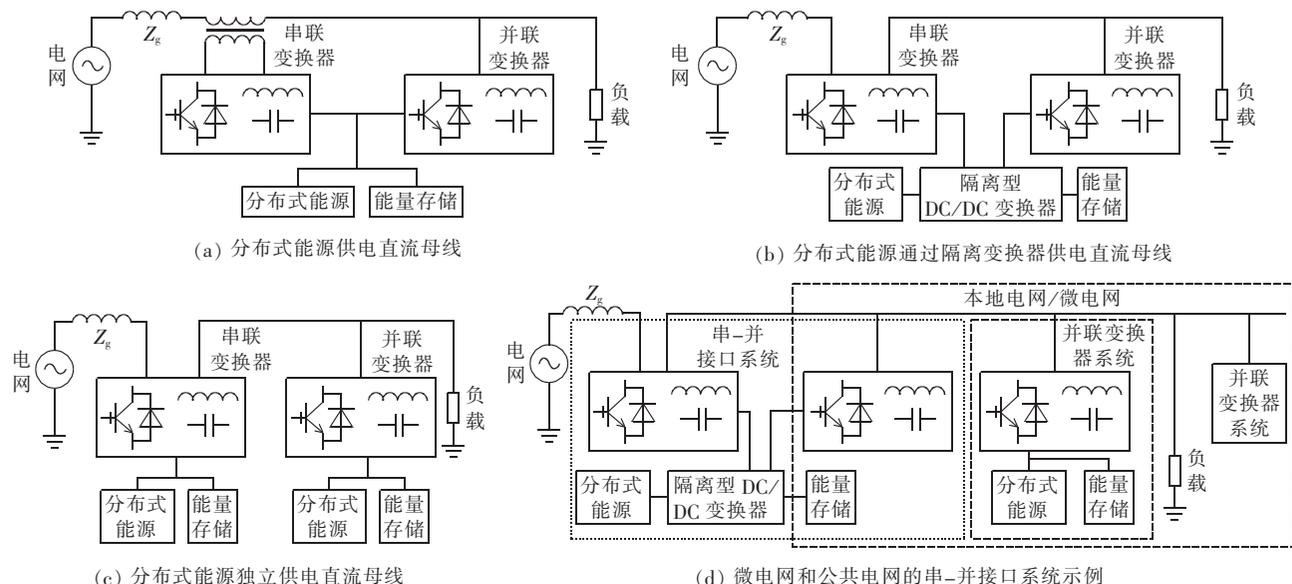


图 3 基于串-并结构再配置的单线图

Fig.3 Single-line diagram of reconfigured serial-parallel structure

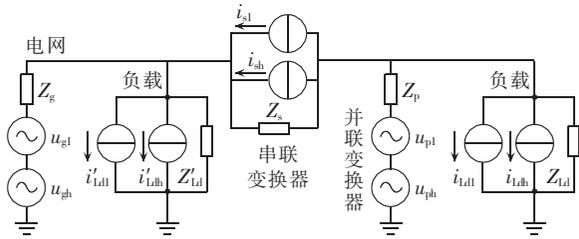


图 4 基于电压、电流源的串-并联变换器系统电路示意图

Fig.4 Circuit of serial-parallel converter system in terms of voltage and current sources

1.3 实验用并网接口系统

以单相全桥逆变器作为基本单元,整个系统电路配置如图 5 所示(略去多并联变换器)。为了简化实验装置,本文并网接口系统中的串、并联变换器由同一个直流电源供电,因此必须将串联或并联变换器中的一个用隔离方式输出。本文选择了在串联变换器的输出隔离,所以图 5 的结构更类似于图 3(a)而非图 3(b)或图 3(d)中的结构,但在系统功能的本质上是一致的。

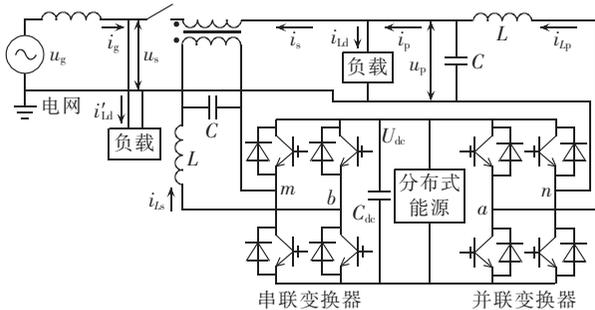


图 5 采用的并网接口系统

Fig.5 Adopted grid-interfacing system

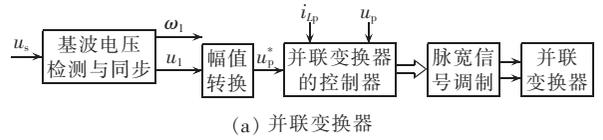
注意到此处没有考虑微电网中的多个并联逆变器,而只关注并网接口系统的功能实现,因此未引入多逆变器的并联控制,仅取了接口处的一个并联变换器进行本地电网的功能实现。关于微电网内的多逆变器并联工作,如前言部分所述已经有很多的前期工作。本文的主要工作是基于串-并拓扑的并网接口概念及其控制实现,所以微电网内的多逆变器并联控制此处不再赘述。

2 系统控制设计与应用

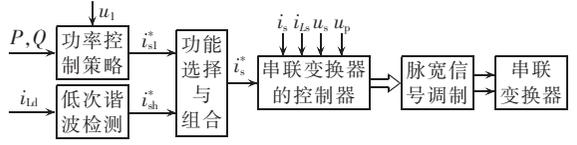
2.1 整体控制架构

图 6 为并网接口系统的全局控制框图,包括参考信号的发生,2 个独立控制器和基本模块即基波电压检测与同步,用于系统检测网侧电压的基波信号和电网频率^[7]。

图 6(a)中将在静止坐标系中得到的电网同步电压经幅值转换和信号归一化处理用于生成一组给定幅值的电压参考信号给并联变换器。因此,本地电网的供电电压保持与电网基波电压同相,而串



(a) 并联变换器



(b) 串联变换器

图 6 整体控制框图

Fig.6 Block diagram of overall control

联变换器仅需较小的电压输出即可调整接口处的功率流。

图 6(b)中串联变换器的控制可以实现多目标控制,即模块“功能选择与组合”所示不同的控制目标可以被集成到系统中。这样在选取控制用参考信号时可以引入功率控制、基波电流控制或谐波电流控制。

而这些参考信号的产生均可以采用现有成熟的方法生成。基于上述串、并联变换器的功能配置,对于并联变换器控制将从系统的不稳定性改善、选择性谐波补偿以及扰动敏感性改善 3 个方面进行讨论;对于串联变换器将从应对畸变电网下的高性能功率控制和谐波补偿实现角度重点阐述其内部电流控制器的设计过程。

2.2 并联变换器控制

并联变换器的控制框图如图 7 所示,其中考虑到控制中的采样及传输延迟表征为 e^{-sT_d} 。系统参数请参见实验结果部分。简化逆变器为单位增益,则控制器的平均模型如图 8 所示。

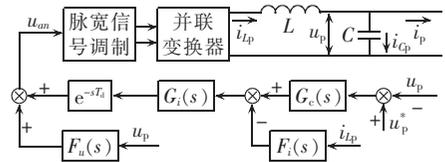


图 7 并联变换器控制框图

Fig.7 Block diagram of parallel converter control

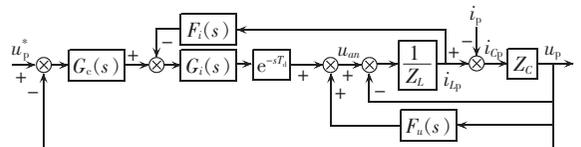


图 8 并联变换器控制原理图

Fig.8 Principle diagram of parallel converter control

2.2.1 系统不稳定性改善

电压前馈控制环一方面将输出电流在输出阻抗上的动态压降引入补偿从而提高动态响应,另一方面可以改善空载情况下的系统不稳定性。

当并联变换器没有本地负载连接也没有向电网供电,图 8 中电流 i_p 为零。此时,从逆变器输出 u_{in} 到滤波器输出 u_p 的传递函数为:

$$G_{pl}(s) = \frac{u_p}{u_{in}} = \frac{Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (1)$$

其中, $Z_L = sL + R_L$, $Z_C = R_C + 1/(sC)$, R_L 和 R_C 分别为电感 L 和电容 C 的等效串联电阻。

考虑到前馈环的采样和传输延时,则图 8 中的前馈环表示为:

$$F_u(s) = K_{ff} e^{-sT_d} \approx K_{ff} \frac{1 - sT_d/2}{1 + sT_d/2} \quad (2)$$

其中, K_{ff} 为前馈增益。

为了分析前馈环的作用,令图 8 中的电感电流环反馈环节 $F_i(s) = 0$, 计算出图 8 的系统传递函数如下:

$$G_{pl-ff}(s) = \frac{u_p}{u_{in}} = \frac{G_{pl}(s)}{1 - G_{pl}(s)F_u(s)} \quad (3)$$

其频域响应如图 9 所示。

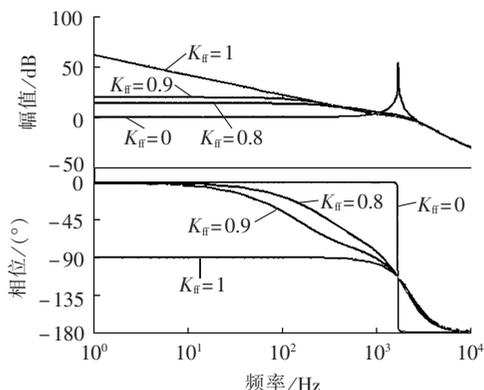


图 9 带前馈环的系统传递函数波特图

Fig.9 Bode plots of system transfer function with feedforward loop

由图 9 可以发现:当 $K_{ff} = 0$ 时,在 LC 谐振频率处会出现一个谐振尖峰,这会限制控制器的带宽并使得控制器难以设计,因此在空载时并联逆变器存在不稳定问题;当 $0 < K_{ff} < 1$ 时,前馈环的引入可以抑制该谐振尖峰,而且 K_{ff} 越接近 1 则前馈环引入的低频段相移越多,继而减少控制系统的相位裕度。因此,前馈环的使用需要综合整体控制设计考虑。

2.2.2 选择性谐波补偿

因为所采用的并网接口系统在当地负载中会出现非线性负载,所以为改善并联输出电压质量,采用多重比例谐振 PR (Proportional and Resonant) 控制器^[21]进行选择性谐波频率段的电压调整,控制器表达式如下:

$$G_c(s) = K_P + \sum_{n=1,3,5,7,9} \frac{2\omega_{ln}K_{ln}s}{s^2 + 2\omega_{ln}s + (n\omega_c)^2} \quad (4)$$

其中, $K_P = 0.55$, $K_{11} = 50$, $K_{13,5,7,9} = 20$, $\omega_{l1} = 10$ rad/s, $\omega_{13,5,7,9} = 6$ rad/s, $\omega_c = 314$ rad/s。

图 10 绘制出图 8 中开环传递函数的波特图,设

$F_i(s) = 0$, $G_i(s) = 1$, 暂时未引入电流环。从图中可以看出,在所选择频率处的开环增益都被增强,以便能够在这些频率点对电压谐波进行控制补偿。同时,前馈环增益 K_{ff} 对开环传递函数的影响也在图中做了比较,可以发现前馈环能够改变低频段的频率响应特性。综合考虑谐振抑制效果与系统的相位裕度,选定 $K_{ff} = 0.8$ 。

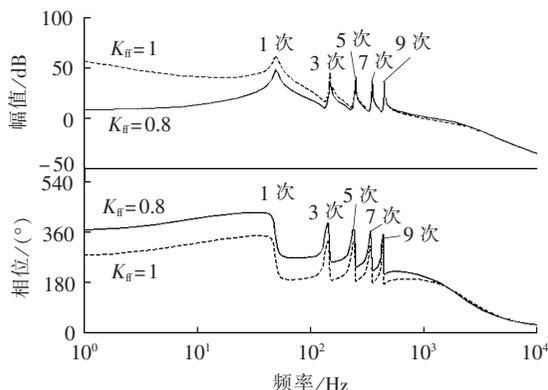


图 10 系统开环传递函数(不含内环)波特图

Fig.10 Bode plots of system open-loop transfer function without inner current loop

2.2.3 扰动敏感性改善

电流内环用于改善系统对输出电流扰动信号的敏感性。从图 10 可知通过电压补偿和前馈控制已经使系统具备 1.2 kHz 的带宽和 20° 的相位裕度,而通过电流内环补偿器 $G_i(s)$ 几乎很难再提高系统带宽。因此为了维持系统在低阶谐波频率段的控制特性,仅仅采样电感电流的高频段成分,并设计电流内环补偿增益为 1,即 $G_i(s) = 1$ 。因此,电流反馈环设计为:

$$F_i(s) = K_{fi} \frac{s}{s + 2\pi f_{fp}} \quad (5)$$

其中, K_{fi} 为电流反馈系数; f_{fp} 为高通滤波带宽。在此,系数 K_{fi} 其实等效为一个内环比例调节。

基于图 8 的控制框图,计算系统对于电流扰动的敏感性关系,可以表示为:

$$G_d(s) = \left. \frac{u_p}{i_p} \right|_{u_r=0} \quad (6)$$

即输出电压对于负载电流变化的响应特性。如图 11 所示为 $G_d(s)$ 的幅频响应图,其中 $f_{fp} = 1$ kHz。

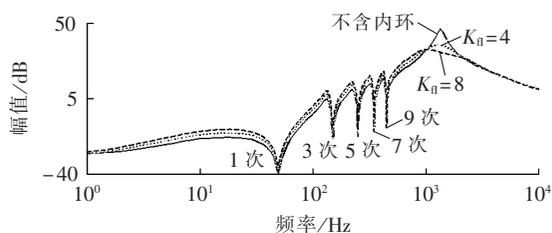


图 11 系统对于电流扰动的敏感特性

Fig.11 System sensitivity to current disturbance

由图 11 可见:当未引入电流内环时(即 $K_{fi} = 0$),

$G_d(s)$ 在 LC 谐振频率点有较高的幅值,意味着任何在这个频率点附近的电流扰动会引起较大输出电压振荡;而通过引入电流内环,该谐振可以得到很好的衰减,但在低频段会有轻微的幅值增加。在实际系统中,该电流反馈系数 K_{ii} 选定为 4。

2.3 串联变换器控制

假设并联变换器是一个理想电压源,图 5 中的串并联结构可以简化为连接到一个等效电网的并联系统。如图 12 所示,该等效电网的电压 $u_{sp}=u_s-u_p$,其中传输线阻抗和变压器漏感一起等效为 L_g 。

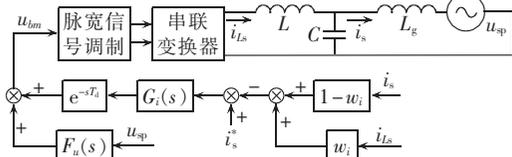


图 12 串联变换器控制框图

Fig.12 Block diagram of serial converter control

基于图 11 的敏感性分析,并联变换器在电网频率和低阶谐波频率段表现为一个非常小内阻的电压源。因此,为了简化串联变换器在大约 1 kHz 以内的频率段控制器设计,这里可以合理地假设并联变换器为一个理想的电压源。图 12 描述了串联变换器的控制结构,其对应的平均模型如图 13(a)所示。注意到图中的若干传递函数使用了并联变换器控制描述中相同的符号,这样做只是为了简化描述。

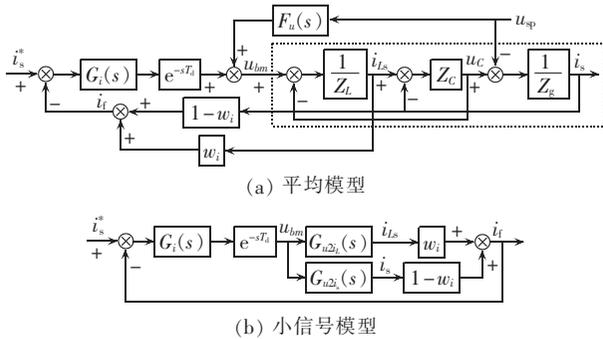


图 13 串联变换器控制原理图

Fig.13 Principle diagram of serial converter control

串联变换器与电网之间形成的 LCL 的滤波器结构,作为一个三阶系统容易引起控制设计上的不稳定问题。为了应对这一问题,相关文献中有很多控制方法^[22-26],例如通过引入额外的控制环或采取有源阻尼等方式进行谐振抑制。考虑到串联变换器设计用于基波和低频谐波电流的控制,为了改善系统的稳定性同时简化低频段的补偿器设计,本文选用了文献[24]中提出的电容分裂法,即同时采样并组合网侧电流和电感电流作为反馈电流。使用该方法可以有效地将系统从三阶降为一阶。

此外,图 13(a)中也引入了电压前馈环和电流反馈控制环。电压前馈环用来减少电网电压扰动对输

出电流的影响,起到改善系统动态响应的作用,这里设定 $F_u(s)=1$ 。下面仅叙述电流反馈控制环的设计。

图 13(b)为小信号模型^[27]。忽略电感和网侧阻抗的寄生电阻,分析得到逆变器输出电压到电感电流和网侧电流的传递函数表达式:

$$G_{u2i}(s) = \frac{i_{ls}}{u_{bm}} = \frac{L_g Cs^2 + 1}{LL_g Cs^3 + (L_g + L)s} \quad (7)$$

$$G_{u2i}(s) = \frac{i_s}{u_{bm}} = \frac{1}{LL_g Cs^3 + (L_g + L)s} \quad (8)$$

通过引入如图 13 所示的权重因子 w_i 进行电流组合可以得到逆变器输出电压 u_{bm} 到反馈电流 i_f 的传递函数:

$$G_{u2i}(s) = w_i \frac{L_g Cs^2 + 1}{LL_g Cs^3 + (L_g + L)s} + (1 - w_i) \frac{1}{LL_g Cs^3 + (L_g + L)s} \quad (9)$$

图 13(b)中,当 $w_i=0$ 为电网电流反馈控制,当 $w_i=1$ 为电感电流反馈控制。

定义 $L_{sum}=L+L_g, w_i=L/L_{sum}$,代入式(9)得:

$$G_{u2i}(s) = \frac{1}{sL_{sum}} \quad (10)$$

因此,三阶系统简化成一阶系统,从理论上消除了谐振问题。

为了控制谐波电流,电流补偿器 $G_i(s)$ 也设计成式(4)中的多 PR 控制器。实验中,谐振项包含了 1、3、5、7 次谐波,相应的参数分别为 $K_p=10, K_{i1}=200, K_{i3}=150, K_{i5,7}=120$,其他 PR 控制参数与式(4)中相同。

图 14 绘制了系统开环传递函数在不同 w_i 值下的波特图。从中可见当 w_i 取 0 或 1 时谐振峰值最高。而当 $w_i=0.474$ 时,谐振基本完全抑制。尽管电感寄生电阻的匹配差异会使得完全消除该谐振很困难,但是该控制方法仍然可以有效地抑制 LCL 结构滤波器引起的谐振问题。

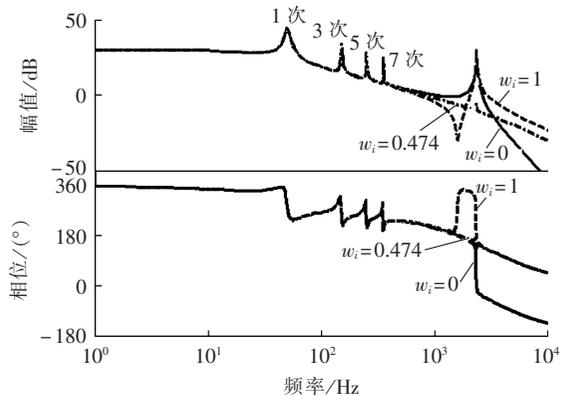


图 14 系统对于电流扰动的敏感特性

Fig.14 System sensitivity to current disturbance

3 实验验证

为验证所提出的并网接口系统及其控制设计,

基于图 5 所示电路搭建实际系统并进行了实验验证。系统参数如下:电网电压有效值 $U_g=230\text{ V}$, 电网频率 $f_g=50\text{ Hz}$, 电网电感 $L_g=2\text{ mH}$, 输出电感 $L=1.8\text{ mH}$, 滤波电容 $C=5\text{ }\mu\text{F}$, 串联变压器变比 $T_N=1:1$, 直流母线电压 $U_{dc}=750\text{ V}$, 直流母线电容 $C_{dc}=4400\text{ }\mu\text{F}$, 开关频率 $f_{sw}=16\text{ kHz}$, 采样频率 $f_{sp}=8\text{ kHz}$ 。

首先测试并网接口系统在电网电压畸变下的工作情况。通过可编程交流电源设定电网电压畸变率为 6.7%, 其中含 5% 的 3 次谐波、4% 的 5 次谐波和 2% 的 7 次谐波。实验结果如图 15 所示, 从上到下分别为电网电压 u_g 、本地电网电压(即并联逆变器输出电压) u_p 、串联逆变器输出电压 u_{sp} 以及并网输出电流 i_s 。分析可见, 在连接到畸变电网情况下并联逆变器能够保证本地输出电压的高供电质量, 而此时串联逆变器通过注入畸变电压, 来保证本地电网向公共电网侧所输出的电流质量, 其中电流 THD=3.3%。

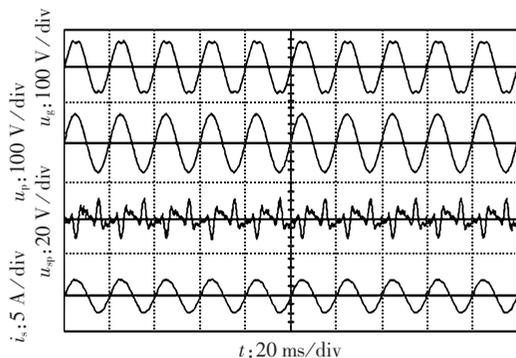


图 15 电网电压畸变下的实验波形

Fig.15 Experimental waveforms for distorted grid voltage

为了验证并网系统应对电网电压跌落的实验效果, 编程设定电网电压突然跌至原有电压的 80%。图 16、图 17 分别为由本地电网向公共电网输出电流有效值为 2 A 和 5 A 的测试结果。

分析可见, 在电网电压跌落时并联逆变器依然能够保持输出电压的稳定并提供较好的供电质量给当地负载, 同时串联逆变器在跌落瞬间立即注入补偿电压, 既保护了本地电网不受电网电压跌落的影响, 也维持了电网电压跌落之前给定的功率传输。其中,

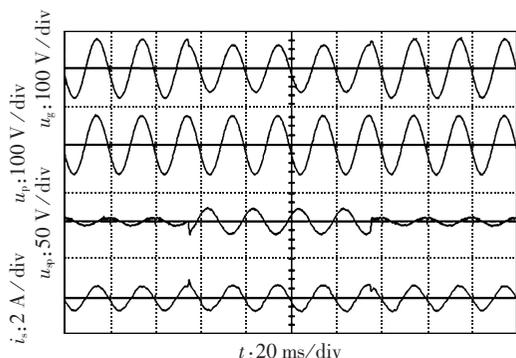


图 16 电网电压跌落下的实验波形(情况 1)

Fig.16 Experimental waveforms for grid voltage sag(case 1)

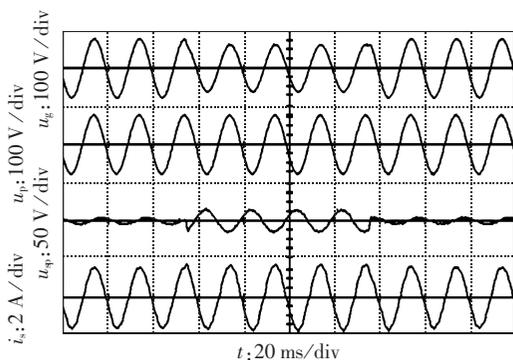


图 17 电网电压跌落下的实验波形(情况 2)

Fig.17 Experimental waveforms for grid voltage sag(case 2)

当输出电网电流有效值给定 2 A 时, 电流 THD=4.6%, 在加大串联逆变器的功率传输至 5 A 后, 整体实验结果仍保持较好的效果。

在给本地电网加非线性负载情况下进行应对电网电压跌落的测试, 并对系统各处电流性能进行观察。图 18 所示为串联逆变器输出电压 u_{sp} 、网侧输出电流 i_s 、本地负载电流 i_{ld} 及并联逆变器输出电流 i_p 。可见, 当本地负载为非线性负载时, 并联逆变器输出电流既提供向电网传输的有功功率电流, 也提供向本地负载传输的非线性电流。此时系统通过串联逆变器注入电网的电流仍为正弦波。可见, 这样既确保了本地电网与公共电网的功率传输, 也实现了网侧与本地电能质量问题的相互隔离。

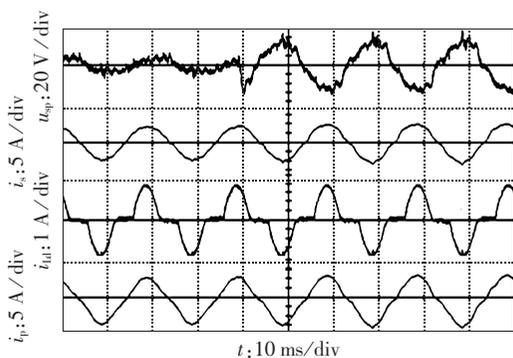


图 18 电网电压跌落下的实验波形(情况 3)

Fig.18 Experimental waveforms for grid voltage sag(case 3)

4 结论

a. 本文提出了基于串-并拓扑结构的并网接口系统概念, 并详细阐述其功能设计与应用实现, 其适用于单相微电网与公共电网的对接;

b. 通过系统功能的解耦及合理配置, 所提出的系统能够可靠连接本地微电网和公共电网, 并实现对网侧电能质量干扰的应对, 保证本地电网供电质量的同时完成 2 个电网之间的灵活功率传输;

c. 通过实验室系统有效地验证了所提接口系统的功能有效性以及串、并联逆变器控制器设计的合理性。

参考文献:

- [1] IEEE. IEEE Std 1250-1995 IEEE guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances[S]. Piscataway, USA:IEEE, 1995.
- [2] VANNOYD B, MCGRANAGHAN M F, HALPIN M, et al. Roadmap for power-quality standards development[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2):412-421.
- [3] MASSOUD A S, WOLLENBERG B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2005, 3(5):34-41.
- [4] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C]// Power Electronics Specialist Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004:4285-4290.
- [5] FRERIS L, INFELD D. Renewable energy in power systems[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [6] MACKEN K J P, VANTHOURNOUT K, van den KEYBUS J, et al. Distributed control of renewable generation units with integrated active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1353-1360.
- [7] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Control of grid-interfacing inverters with integrated voltage unbalance correction[C]// Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008:310-316.
- [8] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5):1511-1521.
- [9] 何中一, 邢言, 祁魁杰, 等. 电压基准预同步的逆变器并联运行控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4):115-121.
HE Zhongyi, XING Yan, QI Biaojie, et al. Control for inverters in parallel operation with pre-synchronized voltage references[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4):115-121.
- [10] 申科, 王建曠, 蔡兴国, 等. 动态电压恢复器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(7):65-69.
SHEN Ke, WANG Jianze, CAI Xingguo, et al. Proportional-resonant control for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7):65-69.
- [11] GUERRERO J M, de VICUNA L J, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1205-1213.
- [12] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12):2977-2988.
- [13] 姚玮, 陈敏, 陈晶晶, 等. 一种用于无互连线逆变器并联的多环控制方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1):84-89.
YAO Wei, CHEN Min, CHEN Jingjing, et al. An improved wireless control strategy for parallel operation of distributed generation inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1):84-89.
- [14] 范元亮, 苗轶群, 江全元, 等. 基于下垂控制结构的微电网机组控制设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6):125-130.
FAN Yuanliang, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, et al. Generator control design based on droop control architecture for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6):125-130.
- [15] MOHAMED Y A R I, EL-SAADANY E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of parallel inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6):2806-2816.
- [16] IYER S V, BELUR M N, CHANDORKAR M C. A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9):2420-2432.
- [17] CHEN C L, WANG Y, LAI J S, et al. Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1):6-15.
- [18] CHENG P T, CHEN C A, LEE T L, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2):805-815.
- [19] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6):1586-1593.
- [20] GUERRERO J M, VICUNA L J D, UCEDA J. Uninterruptible power supply systems provide protection[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2007, 1(1):28-38.
- [21] TAO H. Integration of sustainable energy sources through power electronic converters in small distributed electricity generation systems[D]. Eindhoven, Holland: Eindhoven University of Technology, 2008.
- [22] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2010, 8(1):18-28.
- [23] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. Proportional resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Proceeding of Electrical Power Application, 2006, 153(5):750-762.
- [24] LOH P C, NEWMAN M J, ZMOOD D N, et al. A comparative analysis of multi loop voltage regulation strategies for single and three phase UPS systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5):1176-1185.
- [25] LOH P C, HOLMES D G. Analysis of multi loop control strategies for LC/CL/LCL-filtered voltage-source and current-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2):644-654.
- [26] SHEN Guoqiao, XU Dehong, CAO Luping, et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with a LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4):1899-1906.
- [27] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

作者简介:



张巍(1969—),男,甘肃兰州人,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: jhon_sinoy@163.com);

汪飞(1981—),男,江西景德镇人,副教授,博士,通讯作者,研究方向为新能源发电与电能质量控制技术、微电网技术(E-mail: f.wang@shu.edu.cn);

张巍 阮毅(1955—),男,上海人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子与电力传动;

赵春江(1953—),男,上海人,教授,博士,主要从事建筑一体化太阳能光伏发电技术、微电网和智能电网系统的研究和教学工作;

许德志(1979—),男,河北张家口人,博士研究生,研究方向为逆变器并网与电能质量控制技术。

(下转第 47 页 continued on page 47)

Capacity configuration of multi-element composite energy storage system in distribution system with microgrid

XIONG Xiong¹, YANG Rengang¹, LI Jianlin²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100193, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: An improved calculation method of power supply reliability index is proposed for the distribution network with microgrid, which considers the frequency and cumulative time of sensitive composite outages caused by voltage swell and sag to improve the authenticity of traditional reliability index calculation methods. The method of load point reliability evaluation based on the minimal path algorithm and the mechanism of distribution system overall power supply reliability enhancement by the multi-element composite energy storage system are analyzed, based on which, the charging/discharging strategies under normal and fault conditions are worked out and the capacity configuration calculation of multi-element composite energy storage system is proposed. The simulative results of IEEE reliability test system show the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: microgrid; electric power distribution; power supply; reliability; minimal path algorithm; energy storage; capacity configuration

(上接第 39 页 continued from page 39)

Grid-interfacing system for single-phase microgrid

ZHANG Wei¹, WANG Fei¹, RUAN Yi¹, ZHAO Chunjiang², XU Dezhi¹

(1. Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A kind of grid-interfacing system with enhanced voltage quality is proposed for single-phase microgrid. A group of grid-side topologies are developed based on the conventional serial-parallel structure for the interfacing between grid and microgrid with renewable energy, such as photovoltaic power. Different from the conventional configuration, the serial converter of the proposed grid-interfacing system is reconfigured for the bidirectional control of power flow and the isolation of energy disturbances between microgrid and grid; the parallel converter is reconfigured for the local high-quality power supply in the voltage operating mode. Its control system is optimized and simplified by adopting the proportional and resonant controller and split capacitor for enhancing the overall system performance. It maintains the power transfer between microgrid and grid and keeps the high-quality power supply for local loads under different voltage disturbances. Combined with a lab system, the proposed concept is introduced in detail and validated.

Key words: microgrid; grid connection; interface; renewable energy resources; distributed power generation; voltage disturbances; electric converters; control