

# 单相逆变器低频脉动电流抑制机理分析与方法综述

汪 飞,雷志方,梁 东,张 巍,阮 毅

(上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200072)

**摘要:** 首先详细分析了低频脉动电流抑制机理,然后以两级式逆变器为例,基于直流电源输入端、前级 DC/DC 变换器、直流母线电容支路和后期逆变器 4 个位置详述了现有的低频脉动电流抑制方法,主要包括控制策略和拓扑优化。总结阐述了单相逆变器低频脉动电流抑制方法的基本思想,分析讨论了现有方法的技术原理和优缺点。通过对比分析现有低频脉动电流抑制方法的特点,为后续研究点明了方向,并以新型 Boost 逆变器为例,实验验证了新型控制策略对输入低频脉动电流的抑制效果。

**关键词:** 逆变器; 低频脉动电流; 拓扑优化; 控制策略优化

**中图分类号:** TM 464

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.028

## 0 引言

由于环境污染加剧和能源日益紧缺,可再生能源(如风、太阳、水等)被逐步用来可靠替代传统能源(如石油、天然气、煤等)。分布式发电系统作为一种高效利用可再生能源的发电形式,在全球范围内得到广泛发展,其中逆变器是其核心部件<sup>[1]</sup>。单相逆变器广泛应用于小功率(<10 kW)的分布式发电系统、航空直流电源系统和不间断供电电源系统等场合<sup>[2]</sup>。

在燃料电池系统中,当燃料电池输出电流存在频率小于 1 kHz、峰峰值为 2 倍于输出电流平均值的低频脉动分量时,电池输出功率减少幅度高达 10%<sup>[3]</sup>。因此,低频脉动电流会严重影响燃料电池的最大功率输出。此外,低频脉动电流会导致燃料电池过热,增加额外的损耗,缩短使用寿命,使系统效率降低,严重时甚至会导致系统不稳定<sup>[3-7]</sup>。对于光伏发电系统,光伏电池输出电流中的低频脉动分量使其在最大功率点处出现功率振荡,影响最大功率点跟踪,降低了系统效率<sup>[8-10]</sup>。对于两级式逆变系统,低频纹波会导致电流有效值增大,开关管电流应力和通态损耗增加,降低了前级 DC/DC 变换器效率<sup>[11]</sup>。

综上所述,由单相逆变系统交流侧所产生的低频脉动功率,会引起逆变器输入电流的低频脉动,进而影响燃料电池系统或光伏发电系统的性能。因此,如何抑制单相逆变器低频脉动电流成为了研究热点,学者们也提出了不同的抑制方法。本文将现有的低频脉动电流抑制方法归结分类,对抑制机理进行了分析和比较,对研究方向进行了讨论,为后续

的相关研究提供参考。

## 1 低频脉动电流抑制机理分析

为了阐明单相逆变系统低频脉动电流产生的机理,本文将两级式单相逆变器为例进行分析,其分析思路和方法同样适用于单级式逆变器。两级式单相逆变器的结构框图如图 1 所示,主要由前级 DC/DC 变换器和后期 DC/AC 逆变器组成。其中,前级 DC/DC 变换器主要起电压匹配作用,后期 DC/AC 逆变器则是将直流电转换成用户所需的交流电。

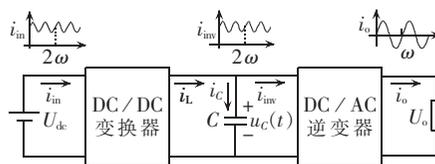


图 1 两级式单相逆变系统结构框图

Fig.1 Block diagram of two-stage single-phase inverter system

在传统的两级式单相逆变器中,直流母线电压纹波较小,可假设母线电容电压为恒定值  $U_c$ 。根据逆变器瞬时输入功率等于输出功率,逆变器输入电流可表示为:

$$i_{inv}(t) = \frac{P_o(t)}{U_c} = \frac{U_o I_o \cos \varphi - U_o I_o \cos(2\omega t - \varphi)}{2U_c} = I_{dc} + i_{2nd} \quad (1)$$

其中,  $P_o(t)$  为逆变器输出瞬时功率;  $U_o$  为输出交流电压幅值;  $I_o$  为输出交流电流幅值;  $\omega$  为输出交流电压角频率,  $\omega = 2\pi f_o$ ,  $f_o$  为输出交流电压频率;  $\varphi$  为输出功率因数角;  $i_{inv}$  为逆变器输入电流。

由式(1)可知,单相逆变器的瞬时输出功率以  $2f_o$  频率脉动。逆变器的输入电流除了直流分量  $I_{dc}$  外,还包含一个以  $2f_o$  频率脉动的低频脉动分量  $i_{2nd}$ , 即二次纹波电流。该低频脉动分量幅值可达到逆变器输入电流平均值的 30% 以上,严重时将会影响系

收稿日期:2015-07-28;修回日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107078);教育部留学回国科研启动基金资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51107078) and the Scientific Research Foundation for Returned Scholars, Ministry of Education of China

统的稳定性<sup>[12]</sup>。

由图 1 可知,逆变器输入电流  $i_{inv}$  由  $i_c$  和  $i_L$  组成,从而可以得出逆变器输入电流的脉动分量由直流母线电容电流和 DC/DC 变换器输出电流中的脉动分量组成。然而,传统模式下母线电压纹波很小,由式(2)可知,在母线电容值较小的情况下,母线电容支路的低频脉动电流分量几乎为零。则逆变器输入侧的低频脉动电流主要由 DC/DC 变换器输出电流提供,并通过 DC/DC 变换器引入到输入源,继而对系统性能造成影响。

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (2)$$

若选择增大母线电容来减小低频脉动电流对输入源的影响,往往需要很大的电容,从而增加系统体积。由于在两级式单相逆变系统中,低频脉动电流可能存在于母线电容电流  $i_c$ 、DC/DC 变换器输入电流  $i_{in}$ 、DC/DC 变换器输出电流  $i_L$  和逆变器输入电流  $i_{inv}$ 。为此,可将这些电流作为研究对象,对系统进行优化设计,分析低频脉动电流的抑制机理。

根据研究对象的不同,如图 2 所示,将现有的低频脉动电流抑制方法分成如下 4 类进行阐述:①基于直流母线电容支路的抑制方法;②基于直流电源输入端的抑制方法;③基于前级 DC/DC 变换器的抑制方法;④基于后级逆变器的二次纹波抑制方法。下文将从以上 4 个方面进行阐述和分析。

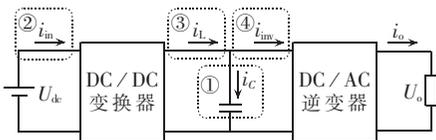


图 2 两级式单相逆变系统

Fig.2 Two-stage single-phase inverter system

## 2 基于直流母线电容支路的抑制方法

基于直流母线电容支路抑制方法的基本思想:使电容支路提供更多的低频脉动电流分量,以减少输入源的低频脉动电流。根据分析方法的不同,又可分为无源抑制方法和有源抑制方法。

### 2.1 无源抑制方法

为了更好地阐述无源抑制方法的根本原理,将 DC/DC 变换器等效为串联开路电压  $U_{oc}$  及输出阻抗  $Z_o$ ,如图 3 所示,图中  $Z_c$  为电容支路阻抗。

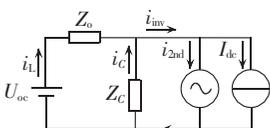


图 3 两级式单相逆变器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of two-stage single-phase inverter system

由图 3 可知,无源抑制方法的本质是在 DC/DC 变换器等效输出阻抗不变的情况下,通过减少直流母线电容支路在  $2f_o$  频率处的阻抗,使更多的低频脉动电流经过直流母线电容支路,从而避免低频脉动电流对前级 DC/DC 变换器和直流电源的影响。

在传统的两级式单相逆变系统中,通过增加直流母线电容来抑制低频脉动电流。这种方法实质上是减少直流母线电容支路阻抗,使大部分低频脉动电流经过直流母线支路。但直流母线电容值的增大往往需要使用电解电容,电解电容寿命短、体积大,会降低系统功率密度。然而,这并不能完全消除前级 DC/DC 变换器和输入源中的低频脉动电流<sup>[13]</sup>。

为此,文献[14-15]利用 LC 电路的串联谐振特性,用谐振频率为  $2f_o$  的 LC 串联谐振电路代替母线电容(图 2 中①处),使低频脉动电流全部经过母线电容支路。

上述方法不需要增加额外的控制电路,具有简单实用、成本低的优点,但需要较大的电感和电容,这导致系统体积增大且不易安装。此外,在并网型逆变系统中,电网电压频率可能存在波动,这会导致低频脉动电流频率的变化,进而会使具有固定谐振频率的 LC 谐振电路的抑制效果变差。

该方法只能抑制固定频率的低频脉动电流,无法对逆变器输出电压频率的波动做出应变,且需要较大的电感、电容元件。

### 2.2 有源抑制方法

有源抑制方法是在无源抑制方法的基础上加入功率开关管,从而构成补偿电路。通过控制补偿电路中功率开关管的通断,使其产生一个与低频脉动电流幅值相同、相位相差  $180^\circ$  的补偿电流,以实现输入源的零纹波电流注入,也称为低频脉动电流补偿法。由于补偿电流可以通过补偿电路中功率开关管的通断进行实时控制,从而避免逆变器输出电压频率波动对低频脉动电流补偿的影响,因此抑制效果更好。

文献[16-17]将电流型有源电力滤波器(APF)作为补偿电路,代替母线电解电容向直流母线注入低频脉动电流,以抵消逆变器产生的谐波,从而实现零纹波电流注入。该类补偿电路的主要特点是无电解电容,不存在电解电容使用寿命短的问题。但直流侧需要较大的电感,使系统体积增加,不易安装。此外,感性元件损耗大、功率密度低的缺点并不符合逆变器的发展趋势。

为了提高系统密度,文献[18]提出如图 4(a)所示的电压型补偿电路,将电感元件换成电容元件;为了减少功率开关管数目,降低系统成本,文献[19-21]提出如图 4(b)和图 4(c)所示的补偿电路。图 4(a)

所示的电压型补偿电路与后两者相比可用于母线电压等级更高、功率更大的场合。上述补偿电路都存在储能元件短路的风险,为了提高系统可靠性,文献[22]提出如图 4(d)所示的补偿电路。

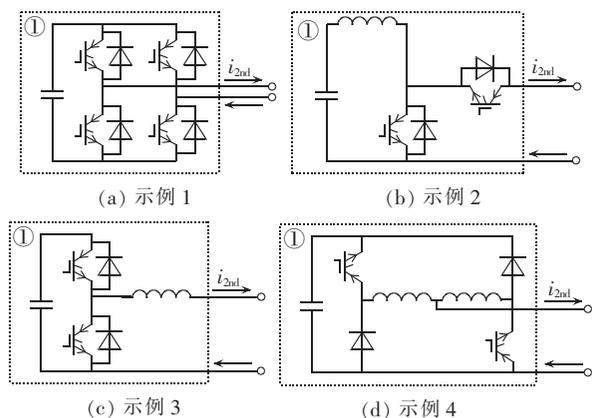


图 4 带低频脉动电流补偿电路的单相逆变系统示例

Fig.4 Examples of single-phase inverter system with low-frequency ripple current compensation circuit

由于系统存在的损耗和补偿电流的变化,直流母线电流会产生较大的波动。因此,低频脉动电流补偿法对电流检测和相应的控制技术具有较高的要求。文献[17,23-24]分别采用模糊控制和滑模控制,以提高并联有源电力滤波器的动态性能。其中,文献[17,23]为了更好地跟踪谐波电流,采用了神经网络滤波器。

综上所述,将低频脉动电流补偿电路用于逆变器直流侧,可以取代电解电容作为谐波发生器,延长了系统使用寿命,更好地抵消了逆变器产生的谐波,且不影响系统其他电路参数的设计,适用性强。然而,该类方法需要附加额外的补偿电路,使得系统成本和设计难度提高。因此,低频脉动电流补偿法适用于对输出电能质量要求较高的场所,如航空电源供电系统。

### 3 基于直流电源输入端的抑制方法

基于直流电源输入端的抑制方法,其本质与在直流母线电容支路并联低频脉动补偿电路的方法一致,不同之处在于低频脉动电流补偿位置的区别。

文献[25-26]分别将图 4(b)和(c)中的补偿电路并联在直流电源输入端,以补偿低频脉动电流。文献[27-28]分别将 Boost 型有源电力滤波器和半桥有源电力滤波器跨接在直流电源输入端,以提供脉动电流。文献[29]在输入端并联 Boost 型有源电力滤波器的基础上,附加了 2 个副边绕组,利用 DC/DC 变换器中隔离变压器的漏感来补偿纹波电流,提高系统效率。

基于直流电源输入端的抑制方法需要附加补偿

电路,增加了系统成本。且低频脉动电流需要经过前级 DC/DC 变换器,从而增加了开关管的电流应力及开关损耗,使系统效率降低。而对于光伏发电系统,基于直流电源输入端的抑制方法可能会影响其最大功率点跟踪。

### 4 基于前级 DC/DC 变换器的抑制方法

为了进一步降低系统体积和成本,以 DC/DC 变换器输出电流为优化对象,基于前级 DC/DC 变换器的抑制方法被提出。其基本思想主要包括 2 个方面:优化控制策略,使母线电容提供更多的低频脉动电流;优化拓扑结构,使变换器提供后级逆变所需的低频脉动电流。

#### 4.1 基于控制策略优化的抑制方法

基于控制策略优化的抑制方法和传统的通过增大直流母线电容的抑制方法一样,都是迫使直流母线电容提供更多的低频脉动电流。现有的控制策略优化方法主要是基于单电流环控制或者电压电流双闭环控制。为了更好地阐述现有的控制策略优化方法,下文用如图 5 所示的控制框图的形式呈现。

根据 2.1 节中对两级式单相逆变器的阻抗分析可知,基于控制策略优化的抑制方法的本质是:通过增加在  $2f_c$  频率处 DC/DC 变换器的等效输出阻抗,来抑制低频脉动电流。

当脉动功率由母线电容提供时,母线电压将产生波动,据此,文献[30-31]通过调整前级 DC/DC 变换器的占空比,迫使直流母线电容提供低频脉动电流分量。文献[30]在电流环控制的基础上,通过对两级式单相逆变系统输入输出的定性分析,直接计算得到脉动功率由中间母线电容提供时母线电压将产生的脉动,进而调整前级 DC/DC 变换器的占空比。此方法是在系统静态条件下分析的,不能跟踪系统中变化的低频脉动电流,补偿效果较差。

为此,文献[31]提出了如图 5(a)所示的基于谐振控制器的抑制方法,在电流环中加入谐振控制器支路,使 DC/DC 变换器在  $2f_c$  谐振频率处的等效输出阻抗无穷大,进而迫使直流母线电容提供低频脉动电流分量。

由于文献[30-31]的方法采用的是单电流环控制,对直流母线电压波动响应慢。为此,文献[12]基于传统的电压电流双闭环控制策略,提出了通过增加电流内环增益并降低电压外环增益的方法,提高 DC/DC 变换器在  $2f_c$  频率处的等效输出阻抗,从而达到抑制低频脉动电流的目的。然而,该方法需要将电压外环增益设计得很低,这降低了系统的动态性能。

为了提高系统动态性能,文献[32]通过在电压外环加入陷波器的方法,使得电流环给定信号不含

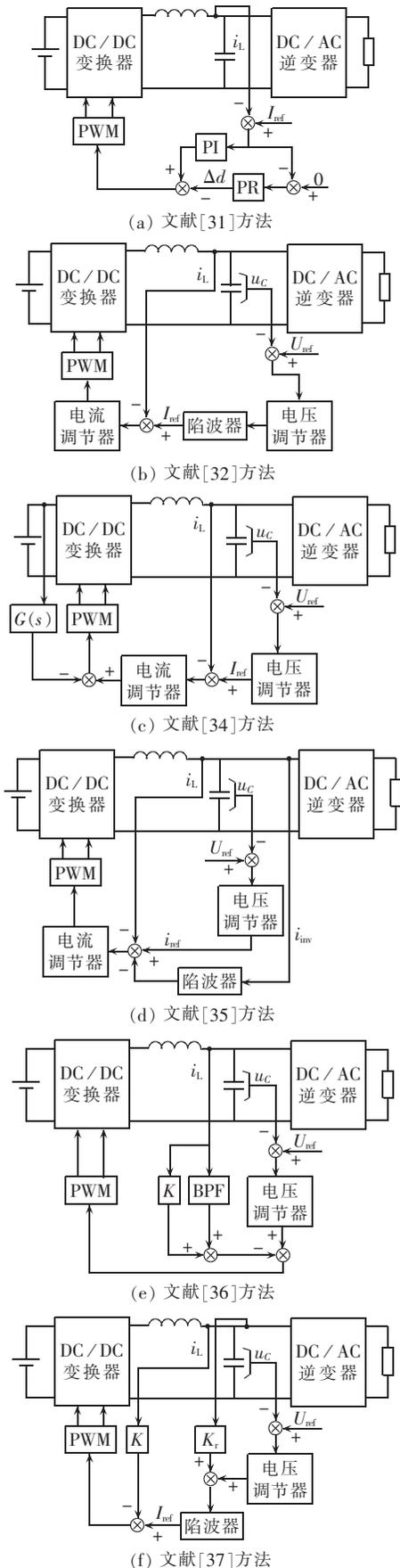


图 5 基于控制策略优化的抑制方法控制框图  
Fig.5 Block diagrams of ripple current suppression based on control strategy optimization

有低频脉动分量,从而使得变换器输出电流不含有低频脉动分量,如图 5(b)所示。该方法的本质如图 6(a)所示,是通过在  $Z_o(s)$  上并联一个虚拟阻抗  $Z_{cf}(s)$ ,使得变换器在非  $2f_o$  频率处的输出阻抗减小,从而在抑制低频脉动电流的同时提高系统动态性能<sup>[33]</sup>。但由于陷波器会带来  $180^\circ$  的相位突变,为了保证足够的相位裕度,系统动态性能提高有限。

为了进一步提高系统动态性能,文献[34]基于电压电流双闭环控制提出输入电流前馈的抑制方法,如图 5(c)所示;文献[35]提出了带陷波器的负载电流前馈方法,如图 5(d)所示;文献[36]则是在电压环的基础上,增加一个带有衰减阻尼的带通滤波器的电流内环,如图 5(e)所示。这三类方法的本质如图 6(b)所示,是在  $Z_o(s)$  上串联一个虚拟阻抗  $Z_{Lf}(s)$ ,以提高 DC/DC 变换器在  $2f_o$  频率处的等效输出阻抗,从而达到抑制低频脉动电流的目的。

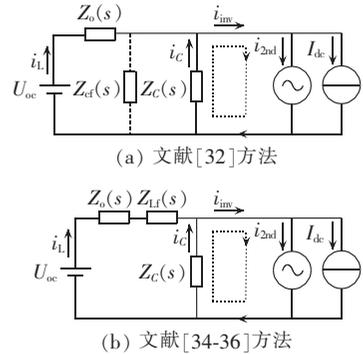


图 6 加入虚拟阻抗的两级式单相逆变器等效电路图  
Fig.6 Equivalent circuits of two-stage inverter with virtual impedance

文献[33]结合文献[32,35],提出在电压外环加入陷波器的基础上,引入带陷波器的负载电流前馈的方法,使得系统能有效抑制低频脉动电流的同时有较好的动态性能。该控制策略经过等效变换后,其控制框图如图 5(f)所示,其本质是在  $Z_o(s)$  串联一个虚拟阻抗  $Z_{Lf}(s)$  后,并联一个虚拟阻抗  $Z_{cf}(s)$ 。

综上所述,基于控制策略优化的抑制方法无需增加额外的电路元件,就能有效地抑制直流电源输入端的低频脉动电流。

#### 4.2 基于拓扑优化的抑制方法

目前针对拓扑优化的抑制方法研究主要包括:基于电流型和电压型 DC/DC 变换器的低频脉动电流抑制效果对比和基于 DC/DC 变换器附加电感电容的功率解耦控制。

文献[37]基于全桥型 DC/DC 变换器,在同等功率条件下,对电流型和电压型的输入输出电流传递函数进行了对比分析,得出电流型结构对低频脉动电流抑制效果更好的结论。且相比于电压型结

构,电流型结构具有更小的 EMI、峰值电流和变压器匝数比。文献[38]提出了双电感 DC/DC 变换器,增加了辅助变压器,以更好地利用变压器漏感电流。与传统的电流型全桥 DC/DC 变换器相比,变压器匝数比减半,且能有效抑制低频脉动电流,但拓扑结构相对复杂。

文献[39]在直流母线上(即图 2 的③处)加入谐振频率为  $2f_0$  的 LC 并联谐振电路,其本质类似于图 6(b)在变换器输出阻抗  $Z_o(s)$  上串联一个阻抗  $Z_L(s)$ ,  $Z_L(s)$  为 LC 并联谐振电路的阻抗。该方法的缺点是:LC 电路体积大、母线电压谐波含量高、母线电容电压应力大、易引起共振使系统不稳定。

在 DC/DC 变换器中加入电感、电容,并配合功率开关管进行功率解耦控制。其实质是利用 DC/DC 变换器的储能元件提供后级逆变器所需的脉动功率,使得输入源输出功率恒定,从而消除了输入源的低频脉动电流。文献[40]通过在隔离变压器原边绕组的中心抽头处加入一个电感电容支路,以提供后级逆变需要的脉动功率。该方法与在直流电源端并联电力滤波器的方法相比,减少了开关管数量,且利用了变压器漏感,使得系统整体需求的电解电容减少到原来的 25%。但 DC/DC 变换器控制开关周期中必须包含零矢量状态,这使得 DC/DC 变换器电压利用率减小、电流变化率增加。

文献[41]则是在推挽变换器的基础上,增加了一个由 2 个功率开关管和 2 个电容组成的主动衰减电路。通过在开关量中加入低频脉动分量,使增加的电容提供后级逆变需要的脉动功率。

经上述分析,在 DC/DC 变换器中加入电感、电容配合功率开关管进行功率解耦的抑制方法,虽然有效地利用了变换器上的功率开关,避免了额外增加补偿电路,但前级 DC/DC 变换器的控制更复杂。

## 5 基于后级逆变器的抑制方法

为了使前级 DC/DC 变换器输出不含脉动分量,以便于输入源的最大功率点跟踪,如光伏电池,针对后级逆变器的抑制方法被提出。目前,该类方法的主要研究包括:控制策略优化的抑制方法和拓扑优化的抑制方法。其本质都是利用逆变器自身的储能元件以提供输出功率脉动分量,从而消除了直流母线上的低频脉动电流。

控制策略优化的方法主要针对新型逆变器,其中,差分逆变器由于其低成本、高密度和高效率的优点,被广泛应用在燃料电池供电系统中。新型 Boost 逆变器就是差分逆变器的一种,其由 2 个 Buck-Boost 变换器组成,输出电压为 2 个 Buck-Boost 变换器输出电压的差值,如图 7 所示。文献[42]基于新型 Boost

逆变器,在输出电压的控制变量上叠加一个相同的正弦分量,以消除逆变器输入端的低频脉动电流。该方法能有效地抑制低频脉动电流,但会在逆变器输入电流中引入 4 次脉动分量,且由于 2 个 Buck-Boost 变换器需同步控制,控制精度要求高,易引入高次谐波。

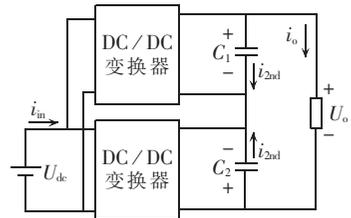


图 7 基于新型 Boost 逆变器的低频脉动电流传导图  
Fig.7 Conduction of low-frequency ripple current for new Boost inverter

拓扑优化的抑制方法主要是在传统的全桥逆变器中添加储能元件,以提供输出功率脉动分量来抑制低频脉动电流。其中,文献[43]基于电流型全桥逆变器,在逆变器输入端的电感后并联一个缓冲电路,通过控制缓冲电路中的电容充放电,以提供输出功率脉动分量。然而,由于缓冲电路中的电容是在逆变器开关管全部关断时进行充电,因此占空比的约束使其对低频脉动电流的抑制效果较差。文献[44]则是通过增加功率开关管组成的第三桥臂,并跨接储能元件以提供后级逆变器输出功率的脉动分量。文献[45]同样增加第三桥臂,但桥臂中点与逆变器输出滤波电容连接,使滤波电容提供脉动功率。该方法虽然避免了额外增加储能元件,但滤波电容含有低频脉动电流,可能引入逆变器输出端。

文献[44-45]的方法增加了功率开关管的数量,使系统成本增加,同时增加了系统的控制难度。文献[46]在直流电源侧加入电容,实现功率解耦功能;加入 2 个电感,实现纹波电流的抑制。该方法能有效地抑制直流侧低频脉动电流,无需电解电容和额外的功率开关管,但由于额外增加 2 个大电感,从而降低了系统的功率密度。

综上所述,基于后级逆变器的抑制方法可以通过优化控制策略和优化拓扑结构来抑制低频脉动电流,进而降低直流母线电容。

## 6 分析与讨论

结合前述对各种抑制方法的分析,现将近年来的研究成果进行归纳分类,如图 8 所示。其中,无源抑制方法具有低成本、易向系统注入谐波的特点,适用于对电能质量要求不高、系统安装空间大的场所。

基于直流电源输入端的抑制方法与基于直流母线电容的有源抑制方法的原理相同,都是通过增加

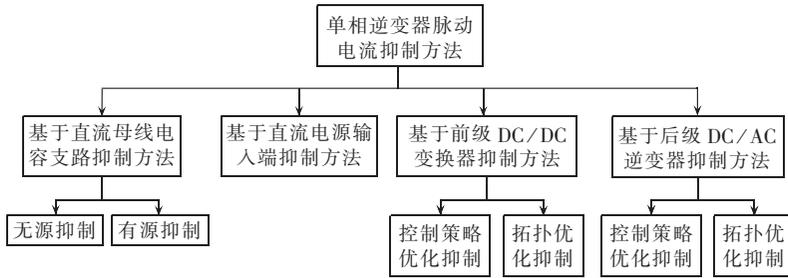


图 8 低频脉动电流抑制方法分类图

Fig.8 Classification of low-frequency ripple current suppression methods

补偿电路,向直流母线注入同幅反向的低频脉动电流。该类方法可以消除不同频率段的低频脉动电流,但需增加补偿电路,同时对低频脉动电流检测和控制策略具有较高的要求,使系统成本大幅增加,适用于如航空电源系统等电能质量要求较高的场所。

基于前级 DC/DC 变换器和后级逆变器拓扑优化的抑制方法都是通过优化拓扑结构,并结合相应的控制策略,迫使变换器中的储能元件提供逆变器所需的脉动功率,从而减少直流电源输入端的低频脉动电流。该类方法相较于前 2 类方法,充分利用了变换器的功率开关器件,在一定程度上降低了系统成本,但控制策略复杂,且容易受到拓扑结构的限制。

针对 DC/DC 变换器和新型逆变器提出的优化控制策略的抑制方法,是通过改变系统控制策略迫使系统内的储能元件提供逆变器输出的脉动功率,从而减少直流电源输入端的低频脉动电流。诸如此类优化控制策略的抑制方法无需增加额外的电路元件,减小了器件的功率损耗,提高了系统的可靠性。从这一角度出发,对新型 Boost 逆变器的控制策略进行了优化研究,得到了如图 9 所示的实验波形。其

中图 9(a)为传统控制策略下新型 Boost 逆变器输出电压  $u_o$ 、输出电流  $i_o$  和输入电流  $i_m$  的实验波形,图 9(b)为采用改进波形控制策略得到的相关波形,比较发现改进波形控制策略在一定程度上减小了低频脉动电流分量,但由于变换器的同步精度不高,实验抑制效果不好,有待进一步完善。

综上,逆变器低频脉动电流抑制可以在直流母线电容支路、直流电源输入端、前级 DC/DC 变换器和后级 DC/AC 逆变器上实现。从本质上讲逆变器低频脉动电流抑制策略也可以分为 2 类:基于拓扑结构的优化和基于控制策略的优化。基于拓扑结构的优化一般都需要增加有源和无源元件,使拓扑结构和控制更为复杂。基于控制策略的优化相对灵活,系统成本低,随着数字控制技术的成熟发展,是未来主要的应用研究方向。尤其是对传统的两级式并网系统和适用于新能源应用场合的新型逆变器的控制策略优化研究是非常具有意义和应用价值的。

## 7 结论

低频脉动电流抑制技术是实现单相逆变器系统高效率、高密度和低成本的关键。本文阐述了单相逆变系统中低频脉动电流抑制机理及低频脉动电流抑制方法的根本思想。根据优化对象的不同,对近年来出现的低频脉动电流抑制方法进行了详细分析,并总结出了抑制低频脉动电流的基本思路:

- a. 迫使直流母线电容提供低频脉动电流分量的思路,如 DC/DC 变换器控制策略优化法;
- b. 直流母线上并联补偿电路,主动补偿低频脉动电流的思路,如低频脉动电流补偿法;
- c. 利用 DC/DC 变换器或 DC/AC 逆变器的储能元件提供低频脉动电流分量的思路,如基于新型 Boost 逆变器的低频脉动电流抑制方法。

最后分析讨论了现有的抑制方法的优缺点,为低频脉动电流抑制方法的研究提供参考,并通过实验波形呈现了采用改进波形控制策略的新型 Boost 逆变器对输入低频脉动电流的抑制效果,有关抑制效果和相关控制策略的优化将是下一步研究方向。

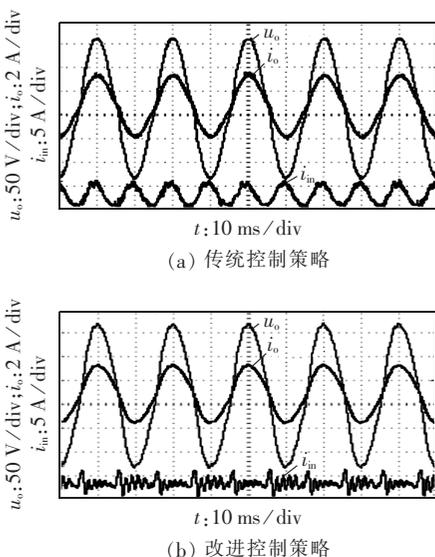


图 9 新型 Boost 逆变器关键实验波形对比

Fig.9 Comparison of key experimental waveforms for new Boost inverter

## 参考文献:

- [1] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [2] MOHAMMAD N S Z, OMAR A M, MAHZAN N N, et al. A review of single-phase single stage inverter topologies for photovoltaic system[C]//2013 IEEE 4th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2013: 69-74.
- [3] PALMA L, TODOROVIC M H, ENJETI P. Design considerations for a fuel cell powered DC-DC converter for portable applications [C]//Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. Hyatt Regency Dallas, USA: IEEE, 2006: 6.
- [4] HAYNES C, WEPFER W J. Characterizing heat transfer within a commercial-grade tubular solid oxide fuel cell for enhanced thermal management[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(4): 369-379.
- [5] WU J F, YUAN X Z, MARTIN J J, et al. A review of PEM fuel cell durability: degradation mechanisms and mitigation strategies [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 184(1): 104-119.
- [6] FONTES G, TURPIN C, ASTIER S, et al. Interactions between fuel cells and power converters: influence of current harmonics on a fuel cell stack[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(2): 670-678.
- [7] CHOI W, HOWZE J W, ENJETI P. Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(2): 1324-1332.
- [8] NAMIN M, AFSHARNIA S. Grid-connected PV with maximum power point tracking techniques implemented in real case study of variable radiation[C]//Workshop on Control and Modeling for Power Electronics 2008. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-5.
- [9] VITORINO M A, DE ROSSITER CORRÊA M B. Compensation of DC link oscillation in single-phase VSI and CSI converters for photovoltaic grid connection[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, Arizona, USA: IEEE, 2011: 2007-2014.
- [10] SULLIVAN C R, AWERBUCH J J, LATHAM A M. Decrease in photovoltaic power output from ripple: simple general calculation and the effect of partial shading[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 740-747.
- [11] 祝国平. 两级式逆变器中前级 DC-DC 变换器的二次纹波电流抑制方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
ZHU Guoping. Methods of reducing second harmonic current in the front end DC-DC converter in two-stage inverter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [12] 王建华, 卢旭倩, 张方华, 等. 两级式单相逆变器输入电流低频纹波分析及抑制[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(6): 10-16.  
WANG Jianhua, LU Xuqian, ZHANG Fanghua, et al. Low frequency input current ripple analysis and reduction in a single phase inverter with two-stage structure[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(6): 10-16.
- [13] LIU C, LAI J S. Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(4): 1429-1436.
- [14] FUKUSHIMA K, NINOMIYA T, SHOYAMA M, et al. Consideration for input current-ripple of ripple-link DC-AC converter for fuel cells[C]//13th Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. Poznan, Poland: IEEE, 2008: 148-153.
- [15] FUKUSHIMA K, NORIOGO I, SHOYAMA M, et al. Input current-ripple consideration for the ripple-link DC-AC converter for fuel cells by small series LC circuit[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2009: 447-451.
- [16] XING K. Modeling, analysis, and design of distributed power electronics system based on building block concept[D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [17] 王萍, 孙雨耕, 许会军, 等. 逆变器直流侧谐波分析与有源补偿[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(14): 52-56.  
WANG Ping, SUN Yugeng, XU Huijun, et al. Harmonic analysis and active compensation for the DC-link of inverter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(14): 52-56.
- [18] WAI R J, LIN C Y. Active low-frequency ripple control for clean-energy power-conditioning mechanism[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(11): 3780-3792.
- [19] DUSMEZ S, KHALIGH A. Generalized technique of compensating low-frequency component of load current with parallel bidirectional DC/DC converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11): 5892-5904.
- [20] PALMA L. An active power filter for low frequency ripple current reduction in fuel cell applications[C]//2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM). Pisa, Italy: IEEE, 2010: 1308-1313.
- [21] WANG R, WANG F, BOROVYEVICH D, et al. A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(5): 1430-1443.
- [22] CHEN Z, CHEN M, LUO Y, et al. Low frequency ripple current compensation with DC active filter for the single-phase aeronautic static inverter[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, Arizona, USA: IEEE, 2011: 1468-1475.
- [23] CIRRINCIONE M, PUCCI M, VITALE G, et al. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(8): 3128-3143.
- [24] 李红波, 张凯, 赵晖. 高功率密度单相变换器的直流有源滤波器研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(15): 40-47.  
LI Hongbo, ZHANG Kai, ZHAO Hui. Researches on DC active power filters for high power density single phase converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(15): 40-47.
- [25] JANG M, AGELIDIS V G. A minimum power-processing-stage fuel-cell energy system based on a Boost-inverter with a bidirectional backup battery storage[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(5): 1568-1577.

- [26] SONG Y J, CHUNG S K, ENJETI P N. A current-fed HF link direct DC/AC converter with active harmonic filter for fuel cell power systems [C] // 39th IAS Annual Industry Applications Conference, 2004. Salt Lake City, Utah, USA: IEEE, 2004: 1.
- [27] CHA H, CHOI J, HAN B. A new three-phase interleaved isolated Boost converter with active clamp for fuel cells [C] // Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. Seoul, Korea: IEEE, 2008: 1271-1276.
- [28] MAZUMDER S K, BURRA R K, ACHARYA K. A ripple-mitigating and energy-efficient fuel cell power-conditioning system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1437-1452.
- [29] TESTA A, DE CARO S, CANIGLIA D, et al. Compensation of the low frequency current ripple in single phase grid connected fuel cell power systems [C] // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [30] LEE S H, AN T P, CHA H J. Mitigation of low frequency AC ripple in single-phase photovoltaic power conditioning systems [J]. Journal of Power Electronics, 2010, 10(3): 328-333.
- [31] JEONG H G, KIM G S, LEE K B. Second-order harmonic reduction technique for photovoltaic power conditioning systems using a proportional-resonant controller [J]. Energies, 2013, 6(1): 79-96.
- [32] 邓翔, 韦微, 龚春英, 等. 一种新颖的抑制两级式直交逆变器输入电流低频脉动的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 24-29.  
DENG Xiang, WEI Zheng, GONG Chunying, et al. A novel technique for low frequency input current ripple reduction in two-stage DC-AC inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(30): 24-29.
- [33] ZHANG L, RUAN X, REN X. Second-harmonic current reduction and dynamic performance improvement in the two-stage inverters: an output impedance perspective [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 394-404.
- [34] 刘斌, 贺建军, 栗梅, 等. 两级式单相逆变器输入端纹波电流双反馈抑制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 187-193.  
LIU Bin, HE Jianjun, SU Mei, et al. Principle and input ripple current active mitigating for two-stage single-phase inverter based on double channel current feedback [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 187-193.
- [35] 祝国平, 阮新波, 王学华. 两级式单相逆变器二次纹波电流的抑制与动态特性的改善 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 72-80.  
ZHU Guoping, RUAN Xinbo, WANG Xuehua. Suppression of the second harmonic current and improvement of the dynamic performance for two-stage single-phase inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 72-80.
- [36] ZHANG Li, REN Xiaoyong, RUAN Xinbo. A band-pass filter incorporated into the inductor current feedback path for improving dynamic performance of the front-end DC-DC converter in two-stage inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 2316-2325.
- [37] PALMA L. DC/DC converter topology selection for low frequency ripple reduction in PEM fuel cell applications [C] // 2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Sorrento, Italy: IEEE, 2012: 315-319.
- [38] PALMA L. Current source converter topology selection for low frequency ripple current reduction in PEM fuel cell applications [C] // 39th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 1577-1582.
- [39] AN H, CHA H. Second harmonic current reduction by using a resonant circuit in a single-phase battery charger [C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, Colorado, USA: IEEE, 2013: 1409-1413.
- [40] ITOH J I, HAYASHI F. Ripple current reduction of a fuel cell for a single-phase isolated converter using a DC active filter with a center tap [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(3): 550-556.
- [41] KWON J M, EUNG-HO K, KWON B H, et al. High-efficiency fuel cell power conditioning system with input current ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 826-834.
- [42] ZHU G R, TAN S C, CHEN Y, et al. Mitigation of low-frequency current ripple in fuel-cell inverter systems through waveform control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 779-792.
- [43] OHNUMA Y, ORIKAWA K, ITOH J. A single-phase current source PV inverter with power decoupling capability using an active buffer [C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, Colorado, USA: IEEE, 2013: 3094-3101.
- [44] VITORINO M A, DE ROSSITER CORREA M B. Compensation of DC link oscillation in single-phase VSI and CSI converters for photovoltaic grid connection [C] // 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, Arizona, USA: IEEE, 2011: 2007-2014.
- [45] VITORINO M A, CORREA M B R, JACOBINA C B. Single-phase power compensation in a current source converter [C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, Colorado, USA: IEEE, 2013: 5288-5293.
- [46] CAI W, JIANG L, LIU B, et al. A power decoupling method based on four-switch three-port DC/DC/AC converter in DC microgrid [C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, Colorado, USA: IEEE, 2013: 4678-4682.

#### 作者简介:



汪 飞

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

雷志方(1990—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为新能源发电与微电网;

梁 东(1991—),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为新能源发电与微电网;

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;

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。

(下转第 198 页 continued on page 198)

on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(11):67-74.

#### 作者简介:

董新洲(1963—),男,陕西周至人,教授,博士研究生导师,IET Fellow,IEEE Fellow,从事行波保护、行波测距、行波



董新洲

选线、无通道保护、特高压输电线路保护、智能变电站、系统保护和小波变换应用方面的研究(E-mail:xzdong@tsinghua.edu.cn);

冯腾(1990—),男,山东东营人,博士研究生,从事电力系统故障分析及继电保护装置测试方面的研究。

## Test platform of protection equipments based on transient traveling wave

DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei, SHI Shenxing, WANG Bin, LUO Shuxin

(State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,  
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Since the protection equipments based on the transient traveling wave fault information are constantly developed, their test platform is urgently needed. The technical requirements of test platform of protection equipments based on transient traveling wave for the frequency and amplitude are discussed and researched, and a detailed implementation scheme with hardware system of the test platform is proposed. The related influencing factors in the test of protection equipments based on traveling wave are analyzed. Its correctness and effectiveness are verified by an application.

**Key words:** test platform; relay protection; traveling wave; technical requirement; application

(上接第191页 continued from page 191)

## Analysis of mechanism and review of methods for low-frequency ripple current suppression of single-phase inverter

WANG Fei, LEI Zhifang, LIANG Dong, ZHANG Wei, RUAN Yi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The mechanism of low-frequency ripple current suppression is analyzed in detail and in terms of control strategy and topology optimization, the existing methods for suppressing the low-frequency ripple current of two-stage single-phase inverter are discussed respectively for four sections: DC input, front-stage DC/DC converter, DC-bus capacitor branch and back-stage inverter. The basic concept of low-frequency ripple current suppression for single-phase inverter is analyzed, the technical principles, advantages and disadvantages of existing methods are summarized, their characteristics are compared and its future research direction is pointed out. As an example, an experiment for a new Boost inverter verifies the effectiveness of new control strategy for low-frequency ripple current suppression.

**Key words:** electric inverters; low-frequency ripple current; topology optimization; control strategy optimization