

# 基于长传输线的并网系统谐波谐振抑制策略研究

张劲松, 段文燕, 孙孝峰, 康 佳, 马 群

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 在基于长传输线的光伏并网系统中, 传输线中存在的寄生电感和电容会导致光伏并网系统出现多个谐振点以及线路末端公共连接点(point of common coupling, PCC)电压升高的问题。同时, 当电网电压中存在背景谐波电压时, 背景谐波的传播放大和逆变器谐振交互会导致并网电压电流波形畸变更加严重。为解决上述问题, 该文提出一种复阻抗型有源阻尼器(complex-impedance active damper, CI-AD)与无源网络结合的控制策略, 从串并联谐振机理的角度分析谐波阻抗特性曲线选取合适的电压电流增益, 可同时抑制背景谐波传播放大和并网系统谐振, 并且降低 PCC 电压, 改善入网电流质量。仿真验证所提方案的正确性和有效性。

**关键词:** 光伏; 并网逆变器; 传输线理论; 背景谐波传播放大; 逆变器谐振; 有源阻尼器

**中图分类号:** TM46

**文献标识码:** A

## 0 引 言

太阳能等可再生能源近年来迅猛发展, 光伏发电以其独特的特点被公认为最有发展前途的技术之一<sup>[1,2]</sup>。但光伏发电易产生谐波, 很多大型光伏电站存在谐波超标的问题, 影响系统稳定性, 并降低电能质量<sup>[3]</sup>。

大型光伏系统通过长传输线并网运行时为优化并网电能质量, 一般使用 LCL 滤波器<sup>[4]</sup>, 但 LCL 滤波器固有的谐振尖峰会引起逆变器并网系统谐振<sup>[5]</sup>, 同时传输线上的寄生电容不可忽略, 系统会出现多谐振问题。当电网电压中存在背景谐波电压时, 背景谐波在传输线上传播放大并和多谐振交互作用, 导致系统发生更严重的振荡, 对光伏并网系统的稳定性产生严重威胁<sup>[6]</sup>。

目前已有大量文献对光伏系统谐波振荡问题展开研究。文献[7,8]提出在电网电流反馈环中加入有源阻尼方案, 通过选取合适的阻尼系数, 达到对 LCL 谐振的抑制作用。文献[9,10]分析带有传输线的并网发电系统谐振特性, 指出当传输线寄生电容不能忽略时系统会出现一系列谐振点。为抑制额外的谐振, 文献[9]提出基于有源阻尼的级联

陷波滤波器的方法, 文献[10]则提出 PR 控制器、陷波滤波器、低通滤波器相结合的控制策略。但传输线上电感和电容的波动会使谐振频率偏移, 使陷波滤波器的阻尼效果变差, 同时该方案均未考虑背景谐波在传输线上的传播放大。文献[11,12]考虑背景谐波振荡产生的影响, 针对传输线末端空载或带载的情况, 提出阻性有源滤波器方案, 通过在传输线末端安装和线路特征阻抗匹配的阻性有源电力滤波器(resistive active power filter, RAPF), 来解决谐波放大问题, 但该方案对系统谐振无作用。以上文献都没有研究长传输线并网 PCC 电压升高的问题。

综上所述, 本文基于带长传输线的光伏并网发电系统, 建立传输线集总参数模型, 研究考虑传输线上寄生电容时系统谐振情况, 针对系统出现的多谐振、PCC 电压升高以及背景谐波传播放大等问题, 提出在 PCC 处安装复阻抗型有源阻尼器和无源网络结合的控制方案。从串并联谐振机理的角度, 分析谐波阻抗特性曲线选取合适的电压电流增益, 可同时抑制背景谐波放大和并网系统多谐振问题, 并降低 PCC 电压, 改善入网电流, 仿真验证了所提方案的正确性和有效性。

收稿日期: 2017-03-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900300); 国家自然科学基金(51677162); 河北省自然科学基金(E2017203337; E2016203156)

通信作者: 孙孝峰(1970—), 男, 博士、教授, 主要从事变流器拓扑及波形控制技术、功率因数校正与有源滤波技术、新能源变换与组网技术等方面的研究。sxf@ysu.edu.cn

# 1 光伏系统谐波谐振机理

## 1.1 背景谐波传播规律分析

本文以三相电压源光伏并网逆变器为主要研究对象,其电路结构如图 1 所示,该系统由光伏阵列、直流侧电容、三相逆变器桥、三相 LCL 滤波器、长传输线以及三相电网组成。其中 LCL 滤波器由滤波电感  $L_f$ 、滤波电容  $C_f$  以及网侧滤波电感  $L_l$  组成,  $V_g$  为电网电压。

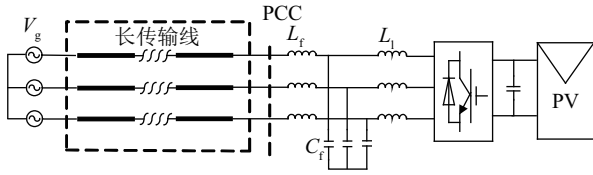


图 1 光伏并网系统等效模型

Fig. 1 Equivalent model of grid-connected microgrid

考虑传输线上寄生电感和电容的存在,其集总参数模型如图 2 所示,传输线上电感、电容、电阻均匀分布,为简化模型以单相模型为例。图 3 为当电网电压中存在谐波电压源时传输线的分布参数模型。图 2 和图 3 中,  $l$  为传输线长度,  $Z_L$  是传输线末端所接负载,  $V_h$  为电网中含有的谐波电压,  $V(x)$  为传输线上距谐波源  $x$  处的谐波电压,  $I(x)$  为传输线上距谐波源  $x$  处的谐波电流,其中  $x$  为传输线某点到谐波源的距离。

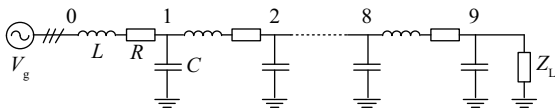


图 2 传输线集总参数模型

Fig. 2 Lumped-parameter model of cable

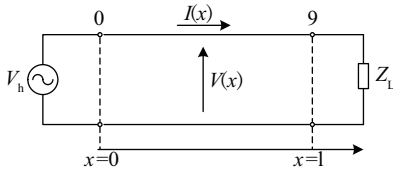


图 3 分布式参数模型

Fig. 3 Distributed-parameter model

如图 3 所示,传输线总长度为  $l$ ,根据均匀传输线理论<sup>[13]</sup>,可得到配电网传输线的特征阻抗  $Z_c$ :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (1)$$

表 1 传输线参数

Table 1 Parameters of transmission line

参数	数值
频率/Hz	50
线长/km	9
节点数	10
单位长度的电感 $L/\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$	1.98
单位长度的电阻 $R/\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	0.36
单位长度的电容 $C/\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$	25

传播常数为:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

式中,  $\omega$  ——角速度;  $\alpha$ 、 $\beta$  ——衰减系数、相位移系数。

波长:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (3)$$

由表 1 和式(2)可得:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} = 8.9 - 0.51j \quad (4)$$

$$\gamma_5 = 0.02 + 0.35j \quad (5)$$

$$\gamma_7 = 0.02 + 0.49j \quad (6)$$

式中,  $\gamma_5$ 、 $\gamma_7$  ——5 次和 7 次谐波的传播常数。

传输线等效阻抗  $Z_{\text{cable}}$  为<sup>[9]</sup>:

$$Z_{\text{cable}} = Z_c \tanh(\gamma l) \quad (7)$$

传输线上任意点处的谐波电压驻波方程如式(8)所示,谐波放大倍数  $M$  如式(9)所示:

$$V(x) = \frac{\cosh[\gamma(l-x)] + Z_c/Z_L \sinh[\gamma(l-x)]}{\cosh(\gamma l) + Z_c/Z_L \sinh(\gamma l)} V_h \quad (8)$$

$$M = \frac{V(x)}{V_h} \quad (9)$$

由于在电力系统中 5 次和 7 次谐波影响较大,所以研究中背景谐波主要考虑 5 次、7 次谐波。同时在带有长传输线的并网系统中由于传输线的对地电容和相间电容在线路上起到主导作用产生了容升效应,从而使线路末端电压(PCC 电压)升高,威胁设备安全。

## 1.2 光伏并网系统多谐振分析

大多数文献为简化模型,通常把长传输线等效成纯电感而不考虑传输线上寄生电容的影响,这时单台逆变器并网系统只存在一个由 LCL 滤波器引起谐振点,但当传输线上寄生电容比较大时纯电感

模型就不能很好地代替传输线,为对传输线进行更准确分析,把传输线等效成分布参数模型十分必要。把传输线等效成分布参数模型,系统等效电路如图4所示。

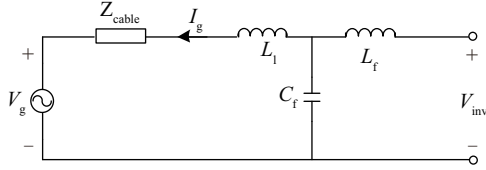


图4 系统等效电路

Fig. 4 System equivalent circuit

入网电流  $I_g$  和逆变器的输出电压  $V_{inv}$  及电网电压  $V_g$  关系如式(10)所示:

$$I_g(s) = \frac{1}{Z_{cable}(1 + L_f C_f s^2) + s[L_l + L_l + L_l L_f C_f s^2]} \cdot V_{inv}(s) + \frac{-L_f C_f s^2 - 1}{Z_{cable}(1 + L_f C_f s^2) + s[L_l + L_l + L_l L_f C_f s^2]} V_g(s) \\ = G_{V_{inv}}(s) \cdot V_{inv}(s) + G_{V_g}(s) \cdot V_g(s) \quad (10)$$

式中,  $G_{V_{inv}}(s)$ 、 $G_{V_g}(s)$ ——入网电流  $I_g$  对于逆变器输出电压  $V_{inv}$  和电网电压  $V_g$  的传递函数;  $Z_{cable}$ ——传输线等效阻抗。

光伏并网逆变器通常采用电流型控制并网,逆变器一般的并网控制结构如图5所示,系统采样传输线输入电流作为反馈,图中,  $I_{ref}^*$  为电流给定,  $G_c$  是电流控制器,这里采用PI控制器,  $G_d$  是包括PWM开关延迟的逆变器传递函数,其他环节函数参考上文。不考虑电网电压的影响,系统开环传递函数  $T$  可表示为:

$$T(s) = G_c(s) \cdot G_d(s) \cdot G_{V_{inv}}(s) \quad (11)$$

式(11)中:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (12)$$

$$G_d(s) = V_{DC} e^{-T_d s} \quad (13)$$

式中,  $T_d$ ——PWM控制延迟,取1.5个采样周期。

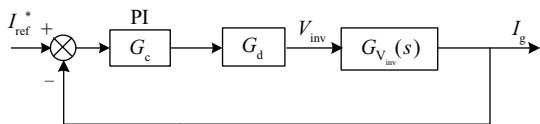


图5 并网逆变器控制框图

Fig. 5 Grid-connected inverter control block diagram

为判断系统稳定性,系统开环传递函数伯德图

如图6所示。由图6可看出当考虑传输线电感和电容的影响时,系统出现多个谐振点,谐振谐波情况更加复杂。

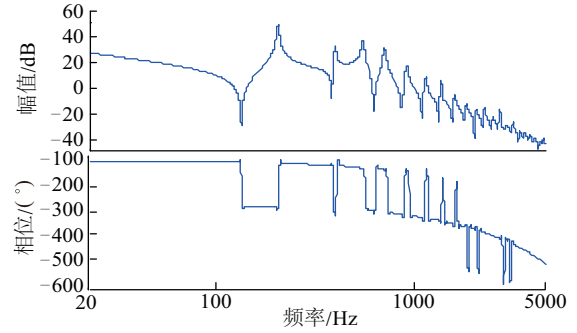


图6 开环传递函数伯德图

Fig. 6 Bode plot of open-loop transfer function

综上所述,在带有长传输线的光伏并网系统中,系统中的多谐振问题和背景谐波电压的放大问题使得并网电流畸变严重,威胁系统稳定性。

## 2 CI-AD抑制策略

### 2.1 CI-AD抑制策略原理分析

为解决上述出现的问题,本文提出一种基于电压电流检测的复阻抗型有源阻尼器(CI-AD)及无源网络结合的控制方案,该方案既能抑制背景谐波在传输线上的传播放大,同时又能抑制系统出现的多个谐振点,使PCC处入网电流达到并网要求,降低PCC电压。

加入控制方案后系统结构框图如图7所示,有源阻尼器安装在PCC处,通过L型滤波器并联在PCC处,为了解决PCC处电压跃升问题,通过在PCC处并联电抗器  $L_d$  来吸收过剩的感性无功,实现降低PCC处电压的目的。

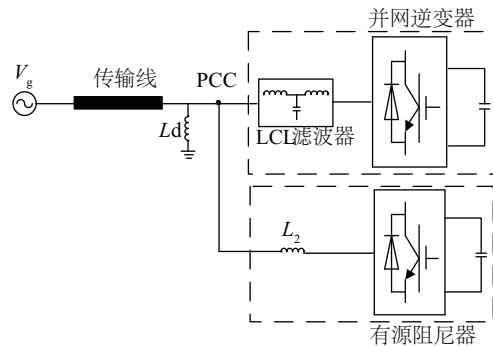


图7 安装CI-AD后系统结构框图

Fig. 7 Control principle diagram of CI-AD

有源阻尼器的控制方案如图 8 所示,图中  $L_2$  为滤波电感,  $I_L$  为有源阻尼器输出电流,  $i_{Ldq}$  为  $d$  轴和  $q$  轴的采样电流。检测传输线末端电压即 9 节点电压  $V_9$  和 9 节点源侧电流  $I_{s9}$ , 提取电压电流谐波分量  $V_{9h}$  和  $I_{s9h}$ 、 $V_{9h}$  和  $I_{s9h}$  乘以相应的增益  $K_v$  和  $K_i$ , 然后相减得到阻尼器的给定电流  $i_{Ldq}^*$  :

$$i_{Ldq}^* = -K_v \cdot V_{9h} + K_i \cdot I_{s9h} \quad (14)$$

式中,  $K_v$  ——  $V_{9h}$  的增益值;  $K_i$  ——  $I_{s9h}$  的增益值。

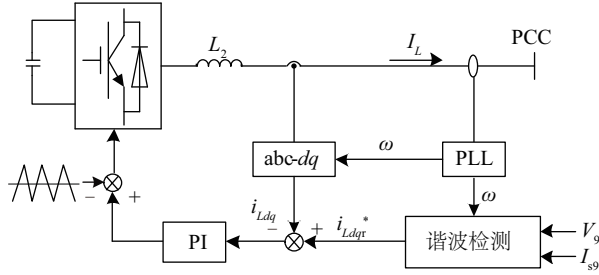


图 8 CI-AD 抑制策略的控制框图

Fig. 8 Control diagram of CI-AD

根据图 8 可列出式(15):

$$(I_{s9h} + K_i \cdot I_{s9h} - K_v \cdot V_{9h}) \cdot 1/sC = V_{9h} \quad (15)$$

得到:

$$\frac{V_{9h}}{I_{s9h}} = \frac{1 + K_i}{sC + K_v} \quad (16)$$

或:

$$\frac{I_{s9h}}{V_{9h}} = \frac{sC + K_v}{1 + K_i} \quad (17)$$

PCC 处安装 CI-AD 时,相当于在 PCC 处安装值为  $Z_D$  的阻抗,其中  $Z_D$  为:

$$Z_D = \frac{V_{9h}}{I_L} = \frac{V_{9h}}{K_v \cdot V_{9h} - K_i \cdot I_{s9h}} \quad (18)$$

结合式(17),可得:

$$Z_D = \frac{V_{9h}}{I_L} = \frac{1 + K_i}{K_v - sCK_i} \quad (19)$$

由式(19)可知,不能将阻抗  $Z_D$  简单的定义为电阻。这里将其定义为复阻抗,如图 8 所示,此类基于电压检测和电流检测的并联有源阻尼器,本文称之为复阻抗型有源阻尼器。

## 2.2 CI-AD 对背景谐波的抑制

### 2.2.1 逆变器建模成传输线末端开路分析

对于电网侧背景谐波,电流型逆变器通常可简单地建模成传输线末端开路状态,具体原因见以下分析。

逆变器简化模型如图 9 所示,图中  $V_{PCC}$  为 PCC 点电压,  $L_1$ 、 $L_f$  分别为逆变器侧电感和网侧电感,  $I_{g,i}$  为逆变器实际输出电流,图中电流型逆变器被调制电压源  $V_M$  代替,从 PCC 处看, LCL 滤波器的频率特性可以通过式(20)、式(21)所示 2 个导纳  $Y_M$ 、 $Y_o$  表示:

$$Y_M = \frac{I_g}{V_{PCC}} \Big|_{V_{PCC}=0} = \frac{Z_{C_f}}{Z_{C_f}Z_{L_f} + Z_{L_1}Z_{L_f} + Z_{C_f}Z_{L_1}} \quad (20)$$

$$Y_o = \frac{-I_g}{V_{PCC}} \Big|_{V_M=0} = \frac{Z_{L_f} + Z_{C_f}}{Z_{C_f}Z_{L_f} + Z_{L_1}Z_{L_f} + Z_{C_f}Z_{L_1}} \quad (21)$$

式中,  $Z_{L_f}$ 、 $Z_{C_f}$ 、 $Z_{L_1}$  —— 电感  $L_f$ 、电容  $C_f$ 、电感  $L_1$  的阻抗。

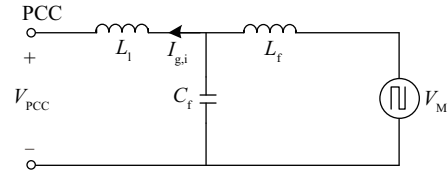


图 9 电流型逆变器简化电路

Fig. 9 Current-mode inverter simplifies circuit

电流控制型逆变器的诺顿等效电路如图 10 所示,其中  $G_{cl}$  为闭环传递函数,  $I_g^*$  为电流给定。

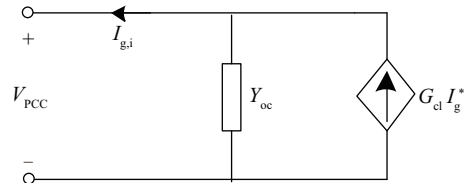


图 10 逆变器诺顿等效电路

Fig. 10 Norton equivalent circuit for inverter

图 10 中,  $Y_{oc}$  是逆变器等效输出导纳:

$$Y_{oc} = \frac{Y_o}{1 + T} \quad (22)$$

式(22)中的  $T$  在式(11)中已给出,代入化简可得:

$$Y_{oc} = \frac{1 + s^2 L_f C_f}{s(L_f + L_1) + s^3 L_f L_1 C_f + G_c G_d} \quad (23)$$

$Y_{oc}$  伯德图如图 11 所示。从图 11 可看出频率从 20 到 1000 Hz,  $Y_{oc}$  的伯德值小于 -60, 图 11 中的箭头所指的 2 个圆心标识指的是 5 次谐波 ( $f=250$  Hz) 和 7 次谐波 ( $f=350$  Hz), 伯德值分别为



-70 和 -80 ,经过计算得:

$$|Z_{oc,5}| = \frac{1}{|Y_{oc,5}|} = \frac{1}{10^{-\frac{-70}{20}}} = 3162.28 \Omega \quad (24)$$

$$|Z_{oc,7}| = \frac{1}{|Y_{oc,7}|} = \frac{1}{10^{-\frac{-80}{20}}} = 10000.00 \Omega \quad (25)$$

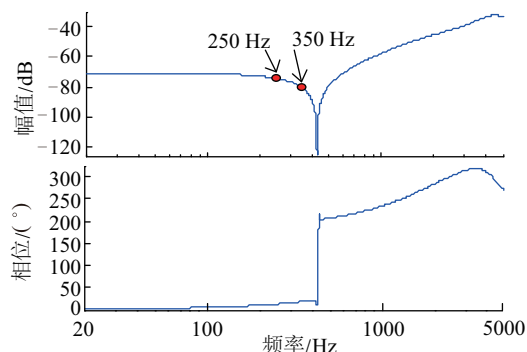


图 11 逆变器等效输出导纳  $Y_{oc}$  伯德图

Fig. 11 Bode plot of inverter equivalent output admittance  $Y_{oc}$

因此,对于 5、7 次谐波逆变器等效输出阻抗大小分别为 3162.28 和 10000.00  $\Omega$ 。传输线等效阻抗  $Z_{cable}$  见式(9),同理,画出  $Z_{cable}$  伯德图如图 12 所示。图 12 的箭头所指的 2 个圆点标识分别是频率为 250 和 350 Hz 处的伯德值,可得到 5 次谐波 ( $f=250$  Hz) 和 7 次谐波 ( $f=350$  Hz) 伯德值分别为 -20 和 30,经过计算得到传输线对于 5 次、7 次谐波阻抗大小分别为 0.10 和 31.62  $\Omega$ 。

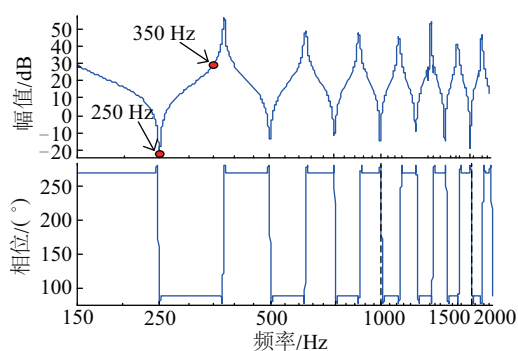


图 12 传输线阻抗  $Z_{cable}$  伯德图

Fig. 12 Bode plot of transmission line impedance  $Z_{cable}$

对比逆变器和传输线对于 5 次和 7 次谐波的阻抗大小,可看出逆变器对于 5 次和 7 次谐波的等效输出阻抗值远大于传输线对于 5 次、7 次谐波阻抗值,因此可认为逆变器等效阻抗值为无穷大,即针对 5 次、7 次背景谐波,电流型逆变器可简单地建

模成传输线末端开路状态。

### 2.2.2 CI-AD 对背景谐波抑制分析

从配电网侧向逆变器侧看,系统对背景谐波的简化电路如图 13 所示,图中  $Z_L$  是传输线末端负载阻抗。

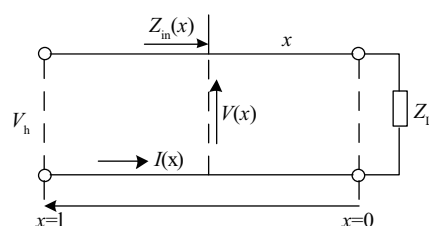


图 13 系统对背景谐波的简化电路

Fig. 13 System simplifies circuit for background harmonics

根据传输线理论,沿传输线以终端为原点,距终端  $x$  处的(从谐波源处向终端看)输入阻抗  $Z_{in}$  可由式(26)表示<sup>[13]</sup>。

$$Z_{in} = \frac{Z_c \cdot (1 + Z_c \cdot \tanh \gamma x / Z_L)}{(\tanh \gamma x + Z_c / Z_L)} \quad (26)$$

PCC 处安装 CI-AD,相当于在 PCC 处安装值为  $Z_D = (1 + K_i)/(K_v - sCK_i)$  的阻抗,因为逆变器等效为对传输线末端开路,因此对应到图 12 和式(26)中,可得到  $Z_L = Z_D$ ,传输线上从谐波源发出的能量一部分被负载  $Z_D$  吸收,另一部分被负载  $Z_D$  反射,形成行驻波。只要  $K_v$  与  $K_i$  选择适当,使谐波源处在行驻波接近波腹的位置上,那么整个传输线上的谐波电压就能得到有效抑制。

根据式(26)和式(9),可绘制 PCC 安装有源阻尼器情况下的 5 次和 7 次谐波沿传输线上各节点阻抗变化和谐波电压放大变化如图 14 所示。当  $K_i = 0$ ,而  $K_v$  取不同的值时,观察传输线上的各次谐波的输入阻抗情况和电压放大倍数,如图 14 可看出,当某些节点处输入阻抗达到最大值时,相当于发生并联谐振,谐波电压幅值最大,当某些节点处输入阻抗达到最小值时,相当于发生串联谐振,谐波电压幅值最小,综合 5 次、7 次谐波电压放大倍数,在  $K_i = 0$ ,当选择  $K_v = 1/Z_c$  时,5 次、7 次谐波电压放大倍数均小于 1,传输线上的谐波电压不会发生传播放大。

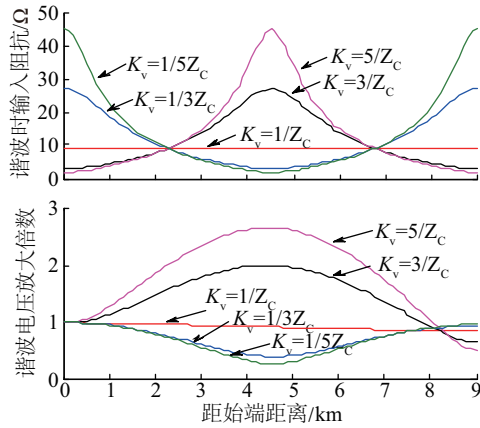
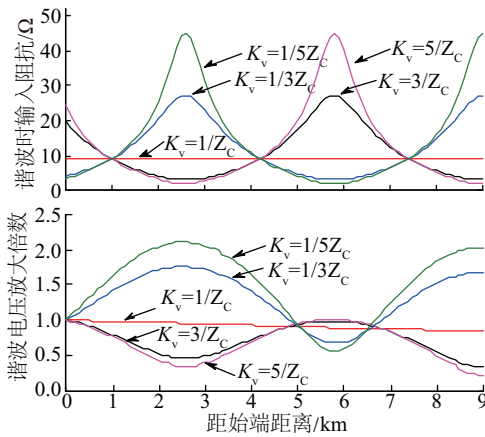
a. 5次谐波时输入阻抗和谐波放大倍数 ( $K_i = 0$ )b. 7次谐波时输入阻抗和谐波放大倍数 ( $K_i = 0$ )

图 14 安装 CI-AD 时各节点输入阻抗和谐波电压放大倍数

Fig. 14 Input impedance and harmonic voltage magnification of each node when CI-AD is installed

当  $K_v = 1/Z_c$  时,  $K_i$  取不同的值, 观察传输线上各次谐波的输入阻抗情况, 如图 15 所示。可看出为

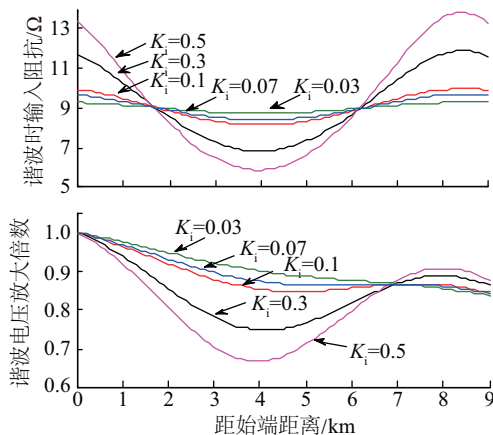
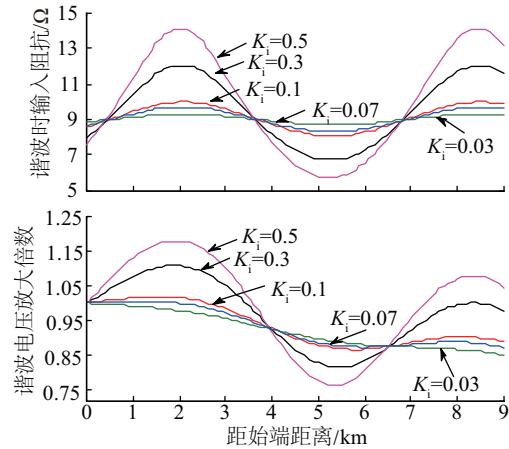
a. 5次谐波时输入阻抗和谐波放大倍数 ( $K_v = 1/Z_c$ )b. 7次谐波时输入阻抗和谐波放大倍数 ( $K_v = 1/Z_c$ )

图 15 安装 CI-AD 时各节点输入阻抗和谐波电压放大倍数

Fig. 15 Input impedance and harmonic voltage magnification of each node when CI-AD is installed

在不放大 5 次、7 次谐波电压的同时, 最大的衰减 5 次、7 次谐波电压, 选择  $K_i$  等于 0.1。

### 2.3 CI-AD 对光伏系统多谐振点的抑制

在 PCC 处并联有源阻尼器后, 并网系统等效模型如图 16 所示, 其中  $Z_D$  为有源阻尼器的等效阻抗。

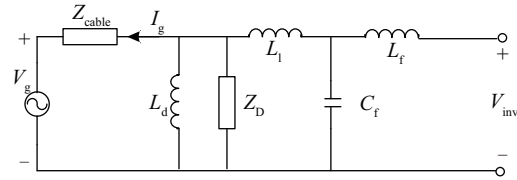


图 16 系统等效电路

Fig. 16 System equivalent circuit

由于  $Z_D$  的存在, 此时  $G_{v_{in}}(s)$  变为:

$$G_{v_{in}}(s) = \frac{1}{Z_A(1 + L_f C_f s^2) + s[L_f + L_1 + L_1 L_f C_f s^2]} \quad (27)$$

式中,  $Z_A$  ——  $Z_{cable}$ 、 $Z_D$ 、 $sL_d$  并联后的阻抗值,  $Z_A = \frac{1}{\frac{1}{Z_{cable}} + \frac{1}{Z_D} + \frac{1}{sL_d}}$ 。

加入有源阻尼器控制方案后, 系统开环传递函数  $T(s)$  伯德图如图 17 所示。由图 17 光伏系统开环传递函数伯德图可以看出, 当 PCC 处安装有源阻尼器后, 图 6 中出现的多个谐振频率点的幅值均在 0 dB 以下, 光伏系统多谐振问题得到解决。

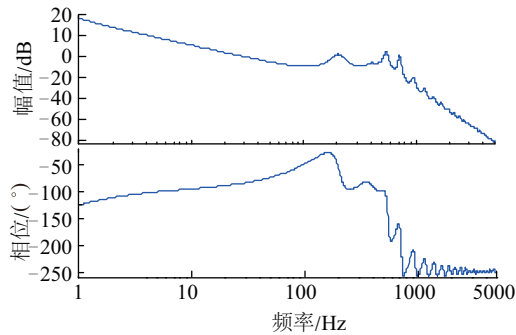


图 17 安装 CI-AD 后系统开环函数伯德图

Fig. 17 Open-loop function Bode diagram of system after installing CI-AD

### 3 仿真验证

根据图 2 中传输线的集总参数模型和表 1 的线路参数搭建传输线仿真模型。本文所提方案用于线路中的各次谐波,在此仅针对 5 次和 7 次谐波进行验证,在电网中加入 2% 的 5 次、7 次谐波电压来模拟背景谐波。仿真参数如表 2 所示。

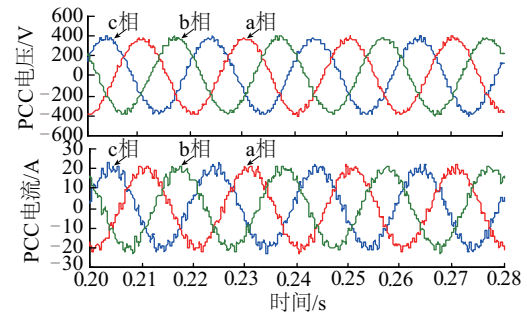
表 2 控制参数

Table 2 Control parameters

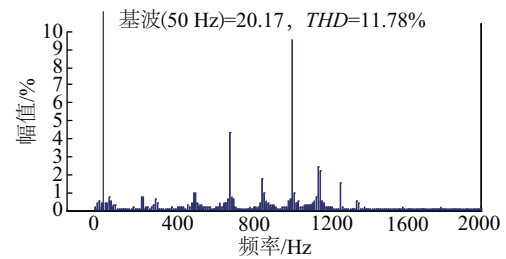
参数	数值
逆变器侧电感 $L_1/\text{mH}$	2.8
逆变器侧寄生电阻 $R_1/\Omega$	0.1
滤波电容 $C_f/\text{mF}$	50
滤波电容寄生电阻 $R_f/\Omega$	0.1
电网侧电感 $L_2/\text{mH}$	2.5
电网侧寄生电阻 $R_2/\Omega$	0.1
输出电流反馈环比例 $K_p$	2
输出电流反馈环积分 $K_i$	8
开关频率 $f_s/\text{kHz}$	10
直流侧电压 $V_{dc}/\text{V}$	800

由图 18 可看出当考虑传输线上寄生电感和电容时,系统会出现 200、550、700、900、1000 Hz 等多个谐振点,光伏系统入网电流畸变严重,且 PCC 电压约为 400 V,跃升比较高。

从图 19 可看出加入抑制方案后,系统出现的多个谐振频率点均得到抑制,总谐波畸变率  $THD$  含量为 1.42%,同时 PCC 处电压降到 310 V。



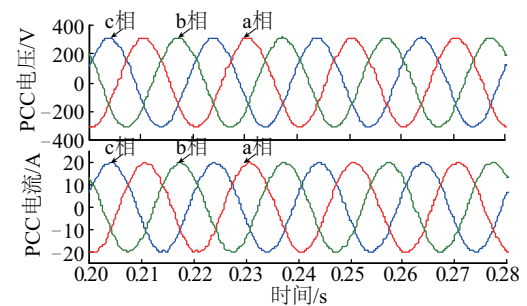
a. PCC 电压和电流波形



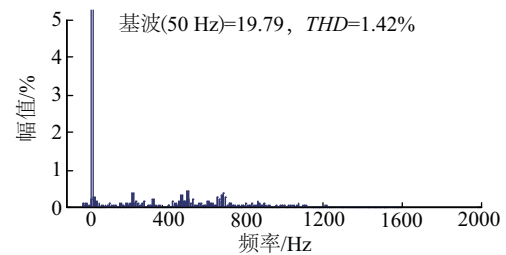
b. 谐波频谱

图 18 电网侧无背景谐波且未安装 CI-AD 时 PCC 处电压电流波形和谐波频谱

Fig. 18 Voltage and current waveforms and harmonics at PCC when grid side has not background harmonics and CI-AD is not installed



a. PCC 电压和电流波形

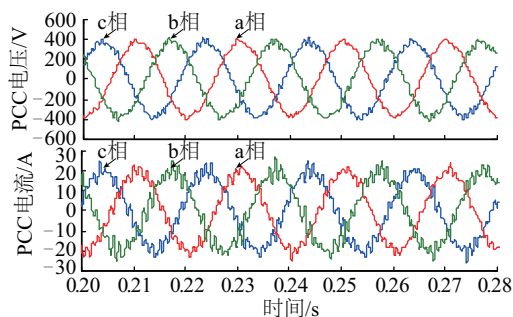


b. 谐波频谱

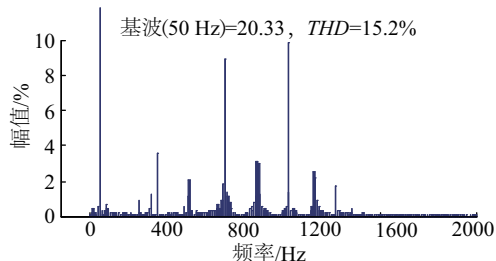
图 19 电网侧无背景谐波且安装 CI-AD 时 PCC 处电压电流波形和谐波频谱

Fig. 19 Voltage and current waveforms and harmonics at PCC when grid side has not background harmonics and CI-AD is installed

将图 18 和图 20 进行对比可得,始端加入 2% 的 5 次、7 次背景谐波电压后,由于沿着传输线传播到 PCC 处背景谐波电压的作用,PCC 处入网电流畸变更加严重。



a. PCC 电压和电流波形



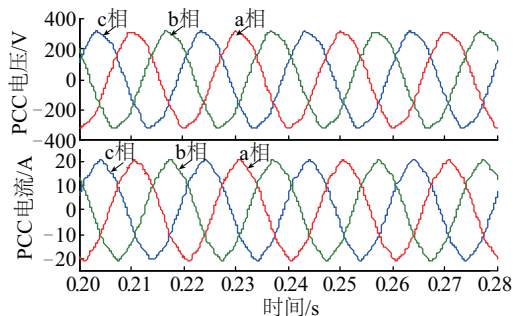
b. 谐波频谱

图 20 电网侧有背景谐波且未安装 CI-AD 时 PCC 处电压电流波形和谐波频谱

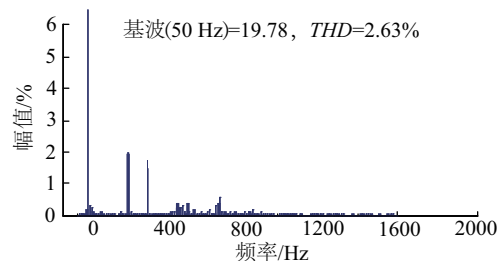
Fig. 20 Voltage and current waveforms and harmonics at PCC when grid side has background harmonics and CI-AD is not installed

为验证该方案对背景谐波的抑制作用,如图 21 所示,加入抑制方案后,PCC 处入网电流 THD 含量从 15.92% 降至 2.63%,达到并网要求。

图 22 是安装 CI-AD 前后,传输线各节点 5 次、7 次谐波电压含量图,由图 21 可看出未加抑制方案前,传输线各节点 7 次谐波放大严重,节点 3~节点 5 谐波电压含量超过 3%,不满足谐波要求。加入抑制方案后,5 次谐波电压稍微有所放大,但是满足



a. PCC 点电压和电流波形

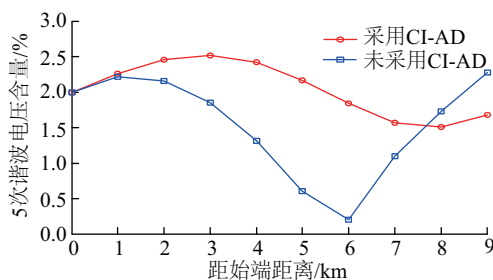


b. 谐波频谱

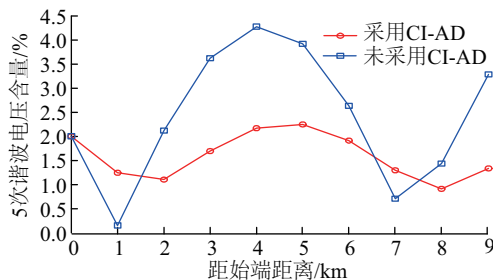
图 21 电网侧有背景谐波且安装 CI-AD 时 PCC 处电压电流波形和谐波频谱

Fig. 21 Voltage and current waveforms and harmonics at PCC when grid side has background harmonics and CI-AD is installed

要求,7 次谐波电压得到抑制,总体满足谐波规定要求。



a. 5 次谐波含量



b. 7 次谐波含量

图 22 安装 CI-AD 前后传输线各节点 5 次、7 次谐波电压含量

Fig. 22 Installation of CI-AD before and after transmission line nodes 5th and 7th harmonic voltage content

## 4 结 论

本文以经长传输线并网的光伏系统为研究对象,提出在 PCC 处安装复阻抗型有源阻尼器和无源网络结合的控制方案,传输线中电容不可忽略时,针对系统多谐振问题以及末端电压升高问题,该方案通过选取合适的电压电流增益,可抑制系统的多



谐振问题同时降低 PCC 电压。当电网中存在背景谐波时,该方案还可以抑制背景谐波的传播放大,有效提高电能质量。仿真也验证该方案的可行性。

### [参考文献]

- [1] Benner J P, Kazmerski L. Photovoltaics gaining greater visibility[J]. IEEE Spectrum, 1999, 36(9): 34—42.
- [2] 孔令国, 蔡国伟. 大规模并网光伏电站的逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 57—63.
- [2] Kong Lingguo, Cai Guowei. Research on control method of inverters for large-scale grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 57—63.
- [3] 赵争鸣, 雷 一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101—107.
- [3] Zhao Zhengming, Lei Yi, He Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101—107.
- [4] Koutroulis E, Blaabjerg F. Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters [J]. IET Power Electronics, 2012, 5(8): 1491—1499.
- [5] Nishida K, Ahmed T, Nakaoka M. A novel finite-time settling control algorithm designed for grid-connected three-phase inverter with an LCL-type filter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2005—2020.
- [6] 王学华, 阮新波, 刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 7—14.
- [6] Wang Xuehua, Ruan Xinbo, Liu Shangwei. Control strategy for grid-connected inverter to suppress current distortion effected by background harmonics in grid voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 7—14.
- [7] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Loh P C. Grid-current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 213—223.
- [8] Xu Jinming, Xie Shaojun, Tang Ting. Active damping-based control for grid-connected-filtered inverter with injected grid current feedback only [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746—4758.
- [9] Zhang Shao, Jiang Shuai, Lu Xi, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 110—120.
- [10] Wu Weibiao, Peng Li, Chen Manlin, et al. Active damping control of multiple resonances for grid-connected inverter with long transmission cable [A]. 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) [C], Taipei, 2016: 263—268.
- [11] Wada K, Fujita H, Akagi H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123—1130.
- [12] Sun Xiaofeng, Zeng Jian, Chen Z. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 135—143.
- [13] 邱关源. 电路(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 426—457.
- [13] Qiu Guanyuan. Circuits (4th Ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 426—457.

## SUPPRESSION OF HARMONIC PROPAGATION IN GRID-CONNECTED SYSTEM BASED ON LONG TRANSMISSION LINE

Zhang Jinsong, Duan Wenyan, Sun Xiaofeng, Kang Jia, Ma Qun

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In a photovoltaic (PV) grid-connected system based on long transmission lines, the existence of parasitic inductance and capacitance on a transmission line may lead to multiple resonance point and induces the voltage of the line end to increase in PV grid-connected system. At the same time, when there is background harmonic in the grid voltage, the propagation of the background harmonics and the resonant interaction of the inverter will cause the waveform distortion of the grid voltage to be more serious. In order to solve the the above problems, this paper presents a control strategy combining the complex impedance type active dampers (CI-AD) with the passive network. From the perspective of the parallel and parallel resonance mechanism, the harmonic impedance characteristic curve is analyzed to select the appropriate voltage and current gain, both the background harmonic propagation amplification and the system resonance can be suppressed, PCC voltage and grid-connected current are improved as well. The simulation verifies the correctness and validity of the proposed strategy.

**Keywords:** photovoltaic; grid- connected inverter; transmission line theory; harmonic propagation amplification; inverter resonant; active dampers