

# 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究

郑鑫<sup>1</sup>, 王若瀚<sup>2</sup>

(1. 重庆高速工程顾问有限公司, 重庆 401147; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 404100)

**摘要:**受线路的阻抗以及各级变压器阻抗存在的影响, 电网与集中式电站间往往会因此产生负面的交互作用, 很可能导致系统的稳态性能降低, 主要体现为入网电流的谐波问题。针对集中式光伏电站输出电流传输过程中的谐波放大问题, 以阻抗重塑为设计思路, 通过串并联虚拟阻抗, 在控制策略中引入网侧电压前馈与输出电流反馈补偿环节, 仿真结果显示, 该策略能有效改善集中式光伏电站输出电流因受系统各阻抗影响导致的谐波问题。

**关键词:**集中式光伏电站; 阻抗模型; 阻抗重塑

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)02-0021-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220205

## Research on Harmonic Suppression Strategy of Centralized Photovoltaic Power Station Based on Impedance Reshaping

ZHENG Xin<sup>1</sup>, WANG Ruohan<sup>2</sup>

(1. Chongqing Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 401147, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404100, China)

**Abstract:** Affected by the impedance of the line and the impedance of various transformers, the negative interactions will be often generated between the power grid and the centralized power station, and it may cause a reduction in steady-state performance of the system, which is mainly reflected in the harmonic problem of grid current. Aiming at the problem about harmonic amplification in the transmission process of output current in the centralized photovoltaic power station, and taking the impedance reshaping as the design idea, the grid-side voltage feedforward and output current feedback compensation links is introduced in the control strategy through series and parallel virtual impedance. The simulation results show that the proposed strategy can effectively improve the harmonic problem caused by the influence of various impedance of the system on the output current of centralized photovoltaic power station.

**Key words:** centralized photovoltaic power station; impedance model; impedance reshaping

## 0 引言

受中国能源分布的影响, 集中式光伏电站主要分布在西北地区, 如新疆、西藏、甘肃等地<sup>[1]</sup>。偏远的地理环境会使得集中式光伏电站需要通过较长距离的输电线路才能上网, 源侧与网侧之间又会有各级变压器进行升压。目前的集中式光伏电站依靠由大量非线性的电力电子器件组成的光伏逆变器汇流输出, 而光伏逆变器往往是在理想条件下设计的, 其

原有设计忽略了网侧、源侧间的结构, 此时的并网系统阻抗结构是稳定的, 输出谐波也在规定的范围内。但是, 输电线路的阻抗以及各级变压器的存在将会改变原有并网系统的阻抗结构, 这很可能会导致系统的稳态性能劣化, 电站输出出现严重的谐波问题。

从实现途径看, 对抑制策略的研究可分为系统控制策略改进与外接设备两类, 但实质都是实现系统阻抗的匹配从而增强并网系统的稳定性。

在控制层面上: 1) 在系统阻抗网路中引入补偿环节, 如文献[2]在电流环前向通道引入补偿环节,

补偿开环传递函数的相位裕度,亦可在并网点电压前向通道处添加补偿环节,等效为重塑逆变器输出阻抗<sup>[3-6]</sup>;2)改进系统原有控制策略,即在设计逆变器时就将各类阻抗考虑在内,通过修改控制器参数或者采用极点配置等方法,实现零极点对消来增强逆变器稳定性<sup>[7-9]</sup>。上述研究均是针对单台或少量逆变器并网系统,并未充分考虑光伏电站的电气结构所带来的影响。

在外界设备层面上:文献[10-13]设计了一种混合有源电力滤波器接在电站母线处,可有效改善分布式电站输出电流的谐波问题,但是对于大型集中式光伏电站,电力滤波器的容量设计和成本又是不可忽视的问题。

根据上述研究现状,下面将充分考虑集中式光伏电站统一控制、集中管理的特点,提出一种基于阻抗重塑的谐波抑制策略,通过引入网侧电压前馈与输出电流反馈补偿环节以改善并网系统的阻抗特性,抑制谐波电流传输过程中的放大问题。

## 1 并网系统的谐波放大问题分析

研究对象为 50 MVA 容量的集中式电站,单台发电单元由光伏电池阵列、500 kW 单极式三相 LCL 型并网逆变器以及 0.27 kV/35 kV 箱式变压器(以下简称箱变)组成,站内 35 kV 母线汇流发电单元输出,经站内主升压变压器(以下简称主升压变)送至 110 kV 电压等级电网。电气结构如图 1 所示。

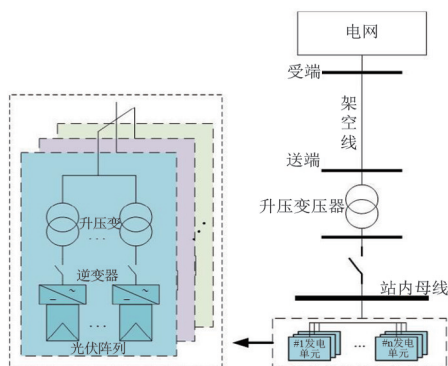


图 1 集中式光伏电站电气结构

对于谐波问题的研究,首先应进行并网系统的阻抗建模。图 2 是从图 1 中抽象等值后的具体阻抗模型,将源侧等效为诺顿等效电流源,网侧等效为戴维南等效电压源,变压器进行  $\tau$  型等值,输电线路进行  $\pi$  型等值。

图 2 可经过电路变换进行简化,得到如图 3 所

示的典型诺顿等效电源与戴维南等效电源的互联阻抗模型。

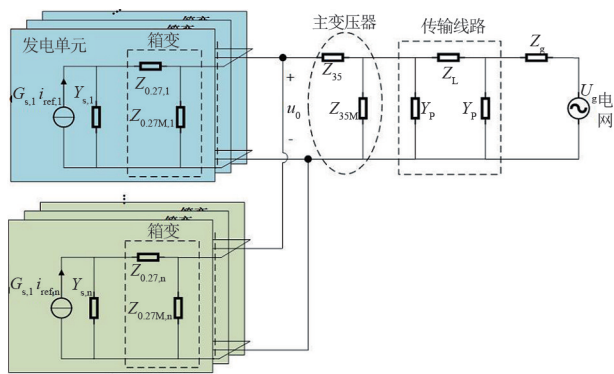


图 2 光伏发电系统具体阻抗模型

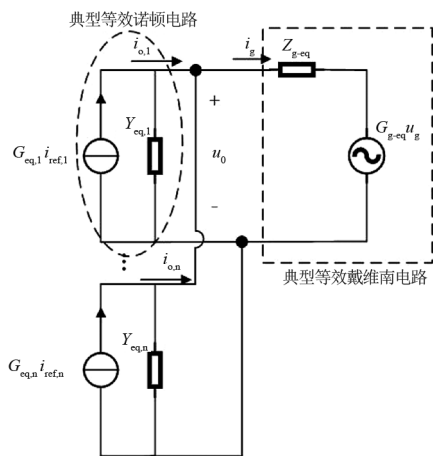


图 3 光伏发电系统简化阻抗模型

图 2 与图 3 中各符号及含义如表 1 所示。

表 1 电路各参数含义

参数	含义
$Z_S$	逆变器等效输出阻抗
$Y_S$	逆变器等效输出导纳
$G_S$	诺顿等效电流源系数
$i_{ref}$	诺顿等效电流源参考电流
$Z_{0.27}$	箱式变压器短路阻抗
$Z_{0.27M}$	箱式变压器励磁阻抗
$\mu_o, i_o$	发电单元输出电压, 电流
$Z_{35}$	主变压器等效电路短路阻抗
$Z_{35M}$	主变压器等效电路励磁阻抗
$Z_L$	线路等效电路阻抗
$Y_P$	线路等效电路导纳
$Z_g$	电网阻抗
$U_g$	电网电压
$i_g$	入网电流
$G_{eq}$	等效诺顿电路电流源系数
$Y_{eq}$	等效诺顿电路电流源导纳
$Z_{g=eq}$	等效戴维南电路阻抗
$G_{g=eq}$	等效戴维南电路电压源系数

注:下标 1,  $\dots$ ,  $n$  表示第  $i$  台发电单元,  $i=1, \dots, n$ 。

表 1 中逆变器的输出阻抗  $Z_S$  和诺顿等效电流

源系数  $G_s$  与控制环节有关,图 4 为所研究的集中式光伏电站中光伏逆变器的电流环控制框图。

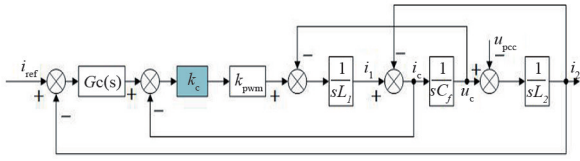


图 4 逆变器电流环

$Z_s$  为该并网点电压  $u_{pcc}$  与输出电流  $i_2$  的传递函数,等效电流源系数即为输出电流  $i_2$  与  $i_{ref}$  的传递函数。

下面以电压  $U_o$  为节点列写节点电压方程,此时考虑  $n$  台发电单元运行。节点电压方程如式(1)所示。

$$\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} U_o + Y_{g-eq} U_o = \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i} + Y_{g-eq} G_{g-eq} U_g \quad (1)$$

式中,  $Y_{g-eq}$  为等效戴维南电路导纳。又因为并联系统中任一发电单元(以第  $j$  台表示)诺顿等效电源满足式(2)。

$$I_{o,j} = G_{eq,j} - Y_{eq,j} U_o \quad (2)$$

通过消去节点电压  $U_o$ ,可以得到第  $j$  台发电单元输出电流  $I_{o,j}$  的表达式为

$$I_{o,j} = \left( G_{eq,j} - \frac{Y_{eq,j}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,j} - \left( \frac{Y_{eq,j} \sum_{i=1}^n G_{eq,i}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,i} - \left( \frac{G_{g-eq} Y_{eq,j} Y_{g-eq}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) U_g \quad (3)$$

所研究集中式光伏电站入网电流的谐波问题,对发电单元间的电流没进行深入研究,因此对式(3)的  $I_{o,j}$  进行求和,求得入网电流  $I_g$  为

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i}}{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} - \left( \frac{G_{g-eq} Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} \right) U_g \quad (4)$$

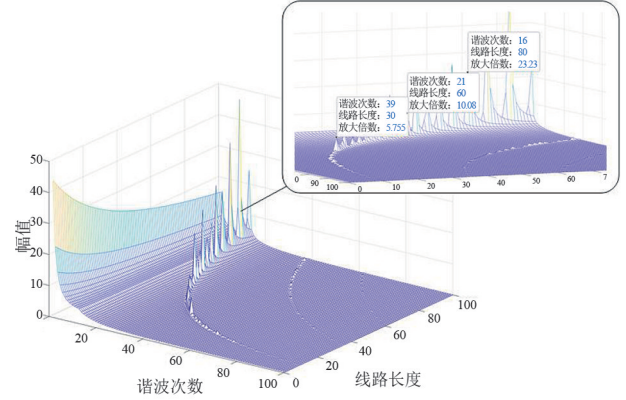
假设各发电单元完全一致,则式(4)可简化为式(5)。

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} n G_{eq,i} I_{ref}}{Y_{g-eq} + n Y_{eq}} - \frac{G_{g-eq} n Y_{eq} Y_{g-eq}}{Y_{g-eq}} U_g \quad (5)$$

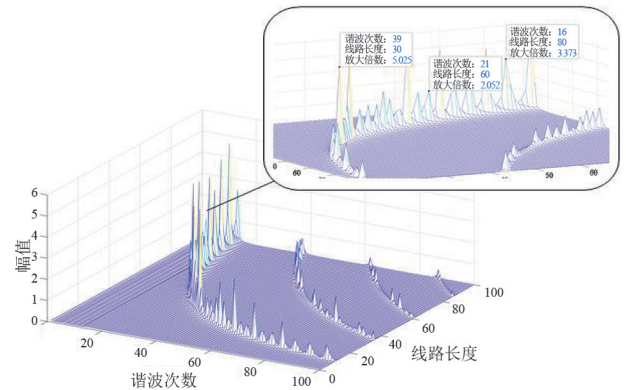
式(5)与式(2)均可看作典型诺顿等效电源关系式  $I_g = G U_{ref} - Y U_g$  的形式,这里将系数  $G$  称为集中

式电站等效电源系数;系数  $Y$  称为电站与电网等效耦合导纳。可以看出,在电站容量确定时,系数  $G$  和  $Y$  只与系统阻抗有关。

利用 Matlab 对前面已建立的集中式光伏电站并网发电系统的等效阻抗模型进行频域分析。图 5 为系数  $G$  和  $Y$  随输电线路长度变化的幅频响应图。



(a) 电站等效电源系数  $G$  的幅频响应



(b) 电站与电网等效耦合导纳  $Y$  的幅频响应

图 5 系数  $G$  和  $Y$  随输电线路长度变化的幅频响应

从图 5 中可以看出,由于各级变压器阻抗及线路阻抗的存在,系统阻抗模型中出现了谐振尖峰,并且尖峰会随线路长度增加而逐渐向低频端移动,图 4 也说明,谐波电流的各谐波频次会受到不同程度的放大影响。

## 2 谐波抑制策略对阻抗模型的影响

前面已经分析得知,抽象等效得出的如图 3 所示的系统阻抗模型存在着谐振尖峰,该尖峰会使得谐波电流传输过程中受到影响。因此,下面考虑在阻抗模型中引入新的阻抗来实现对系统的阻抗重塑。

在逆变器等效电流源输出端串联阻抗,该串联阻抗具备基波阻抗低、谐波阻抗高的特性,其作用是

调节网侧谐波阻抗。同时在等效电流源输出端并联阻抗,该并联阻抗具备基波阻抗高、谐波阻抗低的特性,其作用是不影响入网基波电流,为谐波电流提供通路。图 6 为添加串并联阻抗后的并网发电系统阻抗模型。

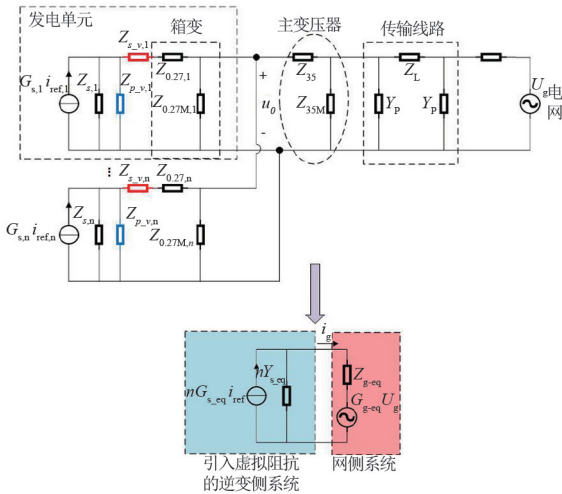


图 6 串并联阻抗后的并网系统阻抗模型及简化

图 6 中  $Z_{p-v}$  为并联阻抗,  $Z_{s-v}$  为串联阻抗, 此时引入串并联阻抗后的源侧等效导纳  $Y_{s-eq}$  与等效电流源系数  $G_{s-eq}$ , 如式(6)、式(7)所示。

$$Y_{s-eq} = \frac{(Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}) + Z_{0.27} + Z_{0.27M}}{[(Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}) + Z_{0.27}] \cdot Z_{0.27M}} \quad (6)$$

$$G_{s-eq} = \frac{Z_s \parallel Z_{p-v}}{Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}} \cdot G_s \cdot \frac{(Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v})}{Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v} + Z_{0.27}} \quad (7)$$

由于  $Z_{p-v}$  与  $Z_{s-v}$  具备相反的阻抗特性, 利用二阶陷波器来构造串并联阻抗。该陷波器的传递函数  $G_{NF}(s)$  如式(8)所示。

$$G_{NF}(s) = \frac{s^2 + (2\pi f_0)^2}{s^2 + 4\pi f_0 s + (2\pi f_0)^2} \quad (8)$$

式中:  $s$  为复频域变量;  $f_0$  为陷波器谐振点。

将  $f_0$  设置到 50 Hz, 设计串联阻抗  $Z_{s-v} = r_s G_{NF}$ , 设计并联阻抗  $Z_{p-v} = r_p / G_{NF}$ , 其中  $r_s, r_p$  为相应的串联、并联比例系数。图 7 为  $Z_{s-v}$  与  $Z_{p-v}$  的幅频响应伯德图。

从图 7 所示的幅频特性可以看出, 引入的串并联阻抗能满足前面阻抗重塑所需的阻抗需求。按照式(6)、式(7)建立的数学模型, 将原系统式(5)中的电流源系数  $G_{eq}$  与输出导纳  $Y_{eq}$  替换为式(6)、式(7)引入串并联阻抗后的等效电流源系数  $G_{s-eq}$  与等效输出导纳  $Y_{s-eq}$ 。对此时系统电站等效电源系数  $G$ 、电站与电网耦合导纳  $Y$  进行幅频响应分析。如图 8、图 9 所示。

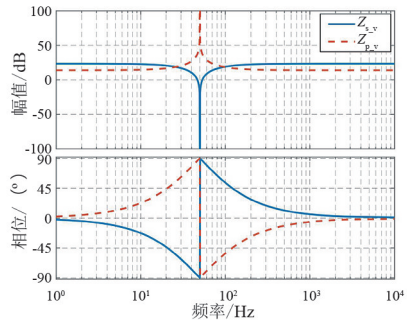


图 7 串并联阻抗的伯德图

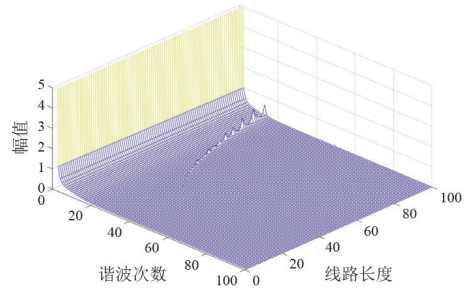


图 8 引入串并联阻抗后的等效电源系数  $G$  幅频响应

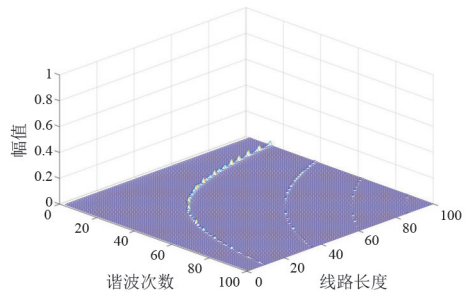


图 9 引入串并联阻抗后的耦合导纳  $Y$  幅频响应

对比图 5 与图 8、图 9 可以看出, 引入了串并联的阻抗后, 经校正的系统其入网电流的等效系数  $G$  与耦合导纳  $Y$  的幅值尖峰得到了有效抑制,  $G$  呈现一种接近理想电流源的特性, 电站与电网耦合导纳  $Y$  的幅值也很低。这说明该策略可实现对系统的阻抗重塑, 起到抑制谐波电流传输过程中受到放大影响的作用。

### 3 补偿环节设计

从控制层面来实现串并联阻抗的引入, 通过在逆变器控制策略中添加补偿环节来等效实现在源侧输出端串并联虚拟的阻抗。

等效电流源输出端串并联阻抗后, 可再次进行诺顿等效得到此时的发电单元阻抗模型, 如图 10 所示。

图 10 中:  $G'_s$  为引入串并联阻抗后的等效电流

源系数;  $Y'_s$  为引入串并联阻抗后的等效输出导纳, 如式(9)所示。

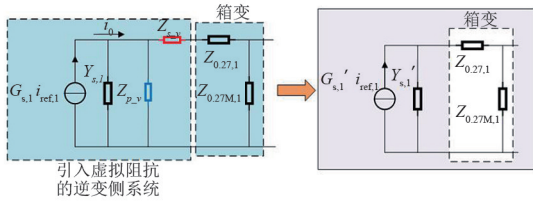


图 10 引入串并联阻抗后的源侧电路等效

$$\begin{cases} G'_s = \frac{\frac{1}{Y_s} \parallel Z_{p-v}}{\left(\frac{1}{Y_s} \parallel Z_{p-v}\right) + Z_{s-v}} \cdot G_s \\ Y'_s = \frac{1}{\left(\frac{1}{Y_s} \parallel Z_{p-v}\right) + Z_{s-v}} \end{cases} \quad (9)$$

对于补偿支路的选择, 由于逆变器的输出阻抗由并联点电压  $u_{pec}$  与输出电流  $i_2$  的传递函数定义, 因此与逆变器输出阻抗并联的虚拟阻抗可以通过引入电压  $u_{pec}$  前馈支路来实现, 同时在输出电流反馈支路上增加补偿环节以实现串联虚拟阻抗。

原有电流环采用网侧电流反馈与电容电流阻尼控制, 在引入并联点电压  $u_{pec}$  前馈支路与输出电流反馈补偿支路后, 新的电流环控制框图如图 11 所示。

图 11 中,  $H_1$  与  $H_2$  均为需要设计的补偿环节。从图 11 中可化简出输出电流  $i_2$  与参考电流  $i_{ref}$  的传递函数  $G_{sv}(s)$ , 如式(10)所示。同时利用梅森公式化简出输出电流  $i_2$  与并网点电压  $u_{pec}$  的比值  $Y_{sv}(s)$ , 即为逆变器输出导纳, 如式(11)所示。

$$G_{sv} = \frac{G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + H_1 G_1 G_2 G_{Cf} k_{qwm} k_c G_c} \quad (10)$$

$$Y_{sv} = \frac{i_2}{u_{pec}} = \frac{G_2 + G_1 G_2 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} + H_2 G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + H_1 G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c} \quad (11)$$

为进行阻抗重塑, 实现抑制幅值尖峰的目的, 式(10)和式(11)应与式(9)中的等效电流源系数  $G'_s$  与等效输出导纳  $Y'_s$  相等。联立式(9)与式(10)、式(11), 可以求解出补偿环节  $H_1$  与  $H_2$  的表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} H_1 = Z_{p-v} Z_{s-v} \cdot A + Z_{p-v} \cdot B + \frac{Z_{s-v}}{Z_{p-v}} \cdot C \\ H_2 = \left( \frac{(Z_{p-v} \cdot A - C) \cdot D}{(Z_{s-v} + Z_{p-v}) \cdot C - Z_{p-v} Z_{s-v} \cdot A} - A \right) \cdot \frac{G_c}{B} \end{cases} \quad (12)$$

式中的各多项式系数在式(13)中给出。

$$\begin{cases} A = G_2 + G_1 G_2 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} \\ B = G_1 G_2 G_{Cf} G_c k_{pwm} k_c \\ C = 1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + B \\ D = 1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + H_1 \cdot B \end{cases} \quad (13)$$

理论上, 引入式(12)所示的补偿环节后, 可等效为在原逆变器系统阻抗模型中引入串并联虚拟阻抗。下面在图 12 所示的仿真模型中引入电压前馈补偿环节与输出电流反馈补偿环节, 以进行谐波抑制效果验证。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数	数值
开关频率 $f_s$	5 kHz
直流电压 $U_{dc}$	557 V
升压箱变	0.27 kV/35 kV, 接法 yn-D11
主升压变	35 kV/110 kV, 接法 Yn-d11
馈线(110 kV/LGJ-185)	电抗 $x_0 = 0.402 \Omega/\text{km}$ ,
	电阻 $r_0 = 0.17 \Omega/\text{km}$ ,
	电纳 $b_0 = 2.78 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$
LCL 滤波器参数	$L_1 = 0.24 \text{ mH}, L_2 = 0.08 \text{ mH}$
	$C_f = 220 \mu\text{F}$
直流稳压电容	5100 $\mu\text{F}$
电流环 PI 控制器参数	$k_p = 0.2, k_i = 10$
电压环 PI 控制器参数	$k_p = 2, k_i = 10$
串联系数	$r_s = 10, r_p = 5$

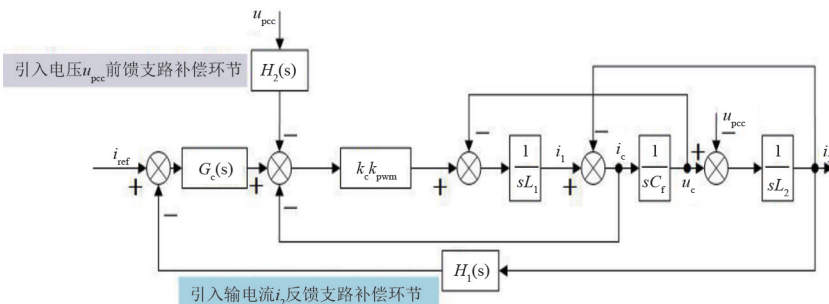


图 11 引入电压前馈与输出电流反馈补偿环节的电流环

以图 5 中尖峰幅值较大的 60 km 与 80 km 为例,如图 13 为架空线路长度为 60 km 时,引入虚拟阻抗前后入网电流波形对比。

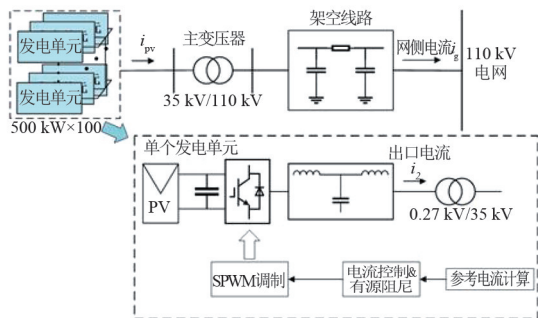
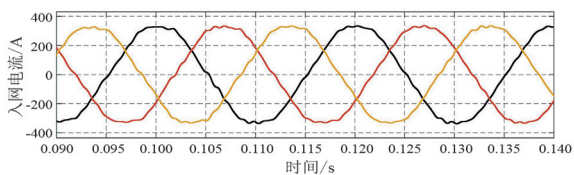
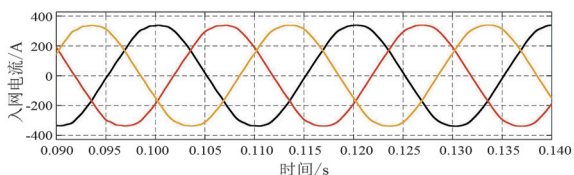


图 12 集中式光伏并网发电系统仿真模型结构



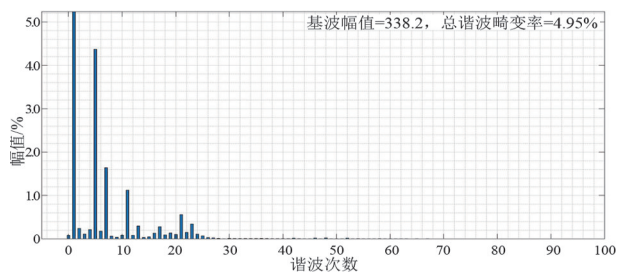
(a) 未引入虚拟阻抗时, 60 km 架空线路条件下入网电流波形



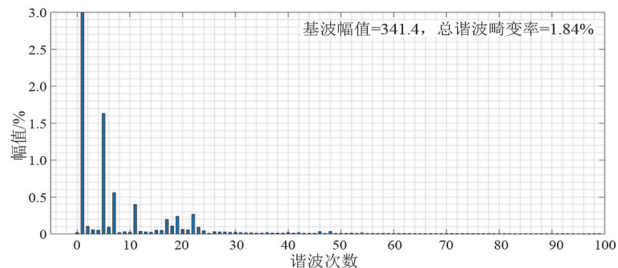
(b) 引入虚拟阻抗时, 60 km 架空线路条件下入网电流波形

图 13 引入虚拟阻抗前后入网电流波形对比  
(架空线路长度 60 km)

对图 13 进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析,结果见图 14。



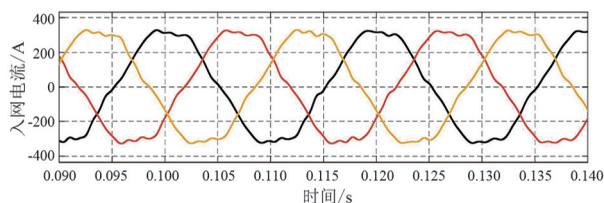
(a) 引入虚拟阻抗前, 60 km 架空线路条件下入网电流频谱



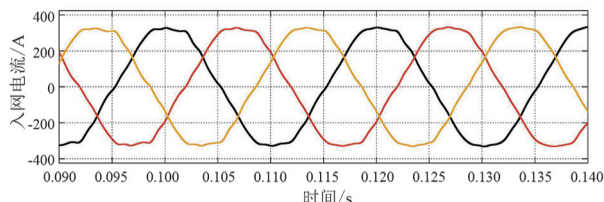
(b) 引入虚拟阻抗后, 60 km 架空线路条件下入网电流频谱

图 14 引入虚拟阻抗前后入网电流频谱对比  
(架空线路长度 60 km)

图 15 为架空线路长度为 80 km 时,引入串并联虚拟阻抗前后入网电流波形对比。



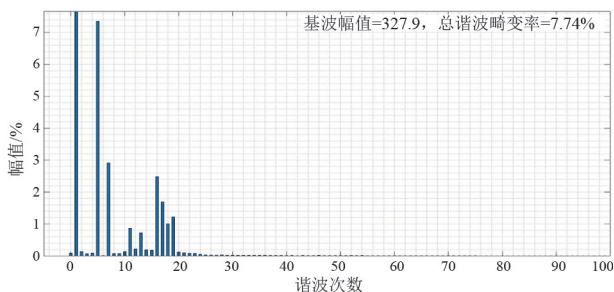
(a) 未引入虚拟阻抗时, 80 km 架空线路条件下入网电流波形



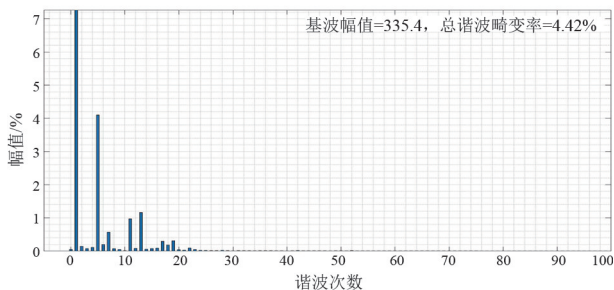
(b) 引入虚拟阻抗时, 80 km 架空线路条件下入网电流波形

图 15 引入虚拟阻抗前后入网电流波形对比  
(架空线路长度 80 km)

对图 15 进行 FFT 分析,结果见图 16。



(a) 引入虚拟阻抗前, 80 km 架空线路条件下入网电流频谱



(b) 引入虚拟阻抗后, 80 km 架空线路条件下入网电流频谱

图 16 引入虚拟阻抗前后入网电流频谱对比  
(架空线路长度 80 km)

从上面结果对比中可以看出,引入串并联虚拟阻抗后,60 km 架空线路长度情况下入网电流总谐波畸变率由 4.95% 降至 1.84%;80 km 架空线路条件下,入网电流总谐波畸变率含量从 7.74% 降至 4.42%。入网电流波形畸变均有所改善,基波幅值均有所回升。结果说明,所设计的电压前馈与输出

电流反馈补偿环节相当于在阻抗模型中引入串并联虚拟阻抗,可实现对系统阻抗的阻抗重塑,能有效地改善入网电流的谐波问题。

## 4 结 论

以 50 MVA 的集中式光伏电站为研究对象,针对谐波电流在系统阻抗模型传输过程中会受到放大影响的问题,对谐波抑制策略进行研究,提出基于阻抗重塑的谐波抑制策略。该策略在逆变器原有控制策略中引入电压前馈与输出电流反馈补偿环节,相当于在系统原有阻抗模型基础上引入串并联虚拟阻抗,结果表明该策略可实现对系统的阻抗重塑,可有效抑制等效电源系数  $G$  和等效耦合导纳  $Y$  的幅值尖峰,起到改善谐波电流在传输过程中放大问题的作用。

值得注意的是,基于阻抗重塑的谐波抑制策略是建立在集中式光伏电站统一控制的特性上,倘若考虑站内线路距离、逆变器间差异,或者是分布式电站,该策略是否有效需进一步研究。同时所建立的集中式光伏并网发电系统模型,只考虑了网源侧以及之间的无源器件,系统谐波仅源自电站内部各发电单元,因此对于考虑系统其他负载谐波源以及电网背景谐波的情况,所提出的抑制策略的有效性还需进一步研究。

### 参考文献

[1] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.

[2] JIA Yaoqin, ZHAO Jiqian, FU Xiaowei. Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1532-1541.

[3] YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.

[4] 杨东升,阮新波,吴恒.提高 LCL 型并网逆变器对弱电

网适应能力的虚拟阻抗方法[J].中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.

- [5] 徐飞,汤雨,谷伟.弱电网条件下 LCL 型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J].中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.
- [6] Céspedes M, Sun J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 5(2): 516-523.
- [7] 周林,张密,杨明,等.考虑电网阻抗影响的 LCL 型并网逆变器控制策略[J].太阳能学报, 2015, 36(9): 2146-2151.
- [8] 严干贵,李龙,黄亚峰,等.弱电网下联网光伏逆变系统稳定性分析及控制参数整定[J].太阳能学报, 2013, 34(11): 1853-1859.
- [9] Lin Zhou, Mi Zhang. Modeling and stability of large-scale PV plants due to grid impedance [C]. IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699274.
- [10] 陈智勇. 离网及并网型分布式发电系统谐振分析与控制技术[D].长沙:湖南大学, 2016.
- [11] Zhiyong Chen, An Luo, Huimin Kuang, et al. Harmonic resonance characteristics of large-scale distributed power plant in wideband frequency domain [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 53-65.
- [12] An Luo, Shuangjian Peng, Chuanping Wu, et al. Power Electronic Hybrid System for Load Balancing Compensation and Frequency-Selective Harmonic Suppression [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 723-732.
- [13] Au Luo, Xiangyong Xu, Fang Lu, et al. Feedback-Feedforward PI-Type Iterative Learning Control Strategy for Hybrid Active Power Filter With Injection Circuit [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3767-3779.

### 作者简介:

郑鑫(1974),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高速公路工程;

王若瀚(1997),男,硕士,研究方向为光伏发电系统稳定性问题。

(收稿日期:2021-10-12)