

# 基于阻抗模型的集中式光伏电站谐波放大机理研究

王若瀚<sup>1</sup>, 徐琳<sup>2</sup>, 郑连清<sup>1</sup>, 董乘甫<sup>1,2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对现有多逆变器并网系统研究缺乏对集中式大型光伏发电系统建模的问题, 利用诺顿、戴维南等效定理对集中式光伏并网系统的发电单元、各级升压变压器、输电线路以及电网进行等值建模, 建立并网发电系统的阻抗模型, 并在此基础上推导谐波与系统各阻抗间的关系。利用频域分析研究谐波在传输过程中的放大机理, 仿真结果给出了谐波电流放大倍数受阻抗模型的等效电源系数与等效耦合导纳的影响关系, 为后续研究谐波抑制策略提供理论基础。

**关键词:** 集中式光伏电站; 阻抗模型; 频域分析

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0001-07

## Research on Harmonic Amplification Mechanism of Centralized Photovoltaic Power Plant Based on Impedance Model

Wang Ruohan<sup>1</sup>, Xu Lin<sup>2</sup>, Zheng Lianqing<sup>1</sup>, Dong Chengfu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of modeling of large-scale centralized photovoltaic power generation systems in the study of the existing multi-inverter grid-connected systems, the Norton and Thevenin equivalent methods are used for equivalent modeling of power generation units, boost transformers, transmission lines and power grid for centralized photovoltaic grid-connected systems, and the impedance model of grid-connected power system is established. On this basis, the relationship between harmonics and system impedances is derived, and the frequency domain analysis is used to study the amplification mechanism of harmonics in the transmission process. The influence of equivalent power coefficient and equivalent coupling admittance of the impedance model on harmonic current amplification factor is given by the simulation results, which provides a theoretical basis for the subsequent research on harmonic suppression strategies.

**Key words:** centralized photovoltaic power plant; impedance model; frequency domain analysis

## 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偏远地区<sup>[1]</sup>,这使得光伏电站往往需要通过较长距离的输电线路才能上网。线路阻抗以及各级变压器会使电网与电站间产生负面交互作用,导致系统稳定性降低,电站输出谐波问题严重。因此,提高光伏电站输出电能质量、降低输出谐波电流含量,对于并网系统的安全稳定运行具有重要意义。

这就需要对集中式光伏发电系统输出谐波的放大机理进行研究。

研究集中式光伏并网系统的谐波问题首先应对系统进行建模,然后再在模型基础上分析谐波放大的机理。国外较早就进行了针对交流系统的建模研究,文献[2]将直流系统中的阻抗建模引入到交流系统,将逆变系统、网侧系统分别进行诺顿电路、戴维南电路等效,然后就可以利用频域分析工具对系统进行研究。该方法提供了交流并网系统的建模工具,但是只建立了单机理想并网模型。

在国内,文献[3-5]将光伏电站各电气结构进行了等值建模,建立了输配电系统的等值电路,但是仅将逆变系统考虑为谐波电流源,忽视其内部控制环节。文献[6]提出诺顿等效电源系数表示逆变系统的内部控制环节,但是建模未考虑传输线路与升压变压器等结构。目前来看,针对光伏并网系统建模问题,研究主要集中在多逆变器并网结构或者分布式电站,鲜有对集中式光伏系统进行各结构充分建模<sup>[7-11]</sup>。

对于谐波放大的机理研究,文献[6,8]采用节点电压法求解了等值电路,得到谐波电流的数学模型。文献[3]则是认为系统的串并联谐振导致了谐波放大。文献[12-13]认为传输线路的分布电容效应会使并网系统出现宽频域谐振带。也有学者通过根轨迹与稳定裕度的分析,认为谐波放大受电网阻抗与光伏电站容量的影响<sup>[11,14-15]</sup>。

根据上述研究现状,充分考虑集中式光伏系统的各环节等效建模问题,建立并网系统的等值电路,在 Matlab 中绘制谐波电流的频域响应,并在 Simulink 中搭建光伏发电模型进行对比验证,进而揭示谐波放大的机理,为后续谐波抑制策略的研究提供理论基础。

### 1 并网系统的等值建模

目前集中式的光伏电站采用发电单元并联结构,通过站内母线汇集,然后经站内升压变压器及并网点主变压器升压,通过长高压输电线路上网。图1为电站电气结构,研究对象为50 MVA的集中式电站,发电单元由输出270 V直流的光伏电池阵列与LCL型的500 kW光伏逆变器和逆变器出口0.27/35 kV升压变压器构成, $n$ 个发电单元经35 kV母线汇流后通过35/110 kV主升压变压器接入高压输电线路上网。

构建集中式光伏发电系统的等值电路,需要对并网发电系统中的发电单元、各级变压器、传输线路、电网侧进行等值简化。采用电流控制的并网型逆变系统在具体阻抗模型中可以进行诺顿等效,电网侧可进行戴维南等效。图2为经过等值后从实际电气结构中提取的具体阻抗模型,其中变压器进行 $\tau$ 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

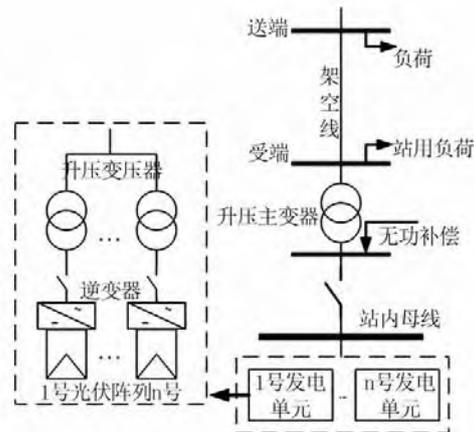


图1 集中式光伏电站电气结构

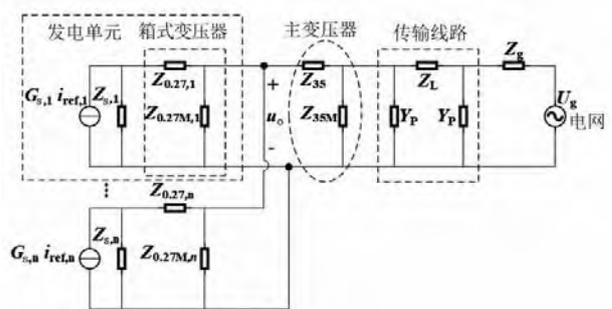


图2 光伏发电系统具体阻抗模型

示的典型的诺顿等效电源与戴维南等效电源的互联阻抗模型。图2与图3中各符号及含义由表1给出。

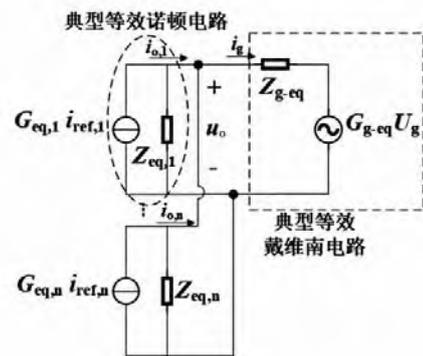


图3 光伏发电系统简化阻抗模型

下面进行等效诺顿、戴维南系数的整定计算。

诺顿等效电流源系数  $G_s$  反映了逆变系统的控制策略,其值等于逆变器出口电流  $i_2$  与参考电流  $i_{ref}$  的比值,即为电流环的闭环传递函数。图4为发电单元中逆变器的电流环框图。由图4可得到带有源阻尼的闭环传递函数  $G_s(s)$ ,如式(1)所示。

$$G_s = \frac{I_2}{I_{ref}} = \frac{G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c} \quad (1)$$

式中:  $G_1 = \frac{1}{sL_1}, G_2 = \frac{1}{sL_2}, G_{Cf} = \frac{1}{sC_f}$ ,  $L_1, L_2, C_f$  分别为 LCL 滤波器的逆变侧电感、网侧电感以及滤波电容;  $k_{pwm}$  为将逆变器调制环节等效出来的比例环节, 等于直流母线电压  $U_{dc}$  与调制载波  $U_{tri}$  之比。

表1 电路各参数含义

参数	含义
$Z_s$	逆变器等效输出阻抗
$G_s$	诺顿等效电流源系数
$Z_{0.27}$	箱式变压器短路阻抗
$Z_{0.27M}$	箱式变压器励磁阻抗
$Z_{35}$	主变压器短路阻抗
$Z_{35M}$	主变压器励磁阻抗
$Z_L$	输电线路等效阻抗
$Y_p$	输电线路等效导纳
$Z_g$	电网阻抗
$U_g$	电网电压
$G_{eq}$	变换简化后的诺顿等效电流源系数
$Z_{eq}$	变换简化后的逆变器等效输出阻抗
$Z_{g-eq}$	变换简化后的戴维南等效阻抗
$G_{g-eq}$	变换简化后的戴维南等效电压源系数

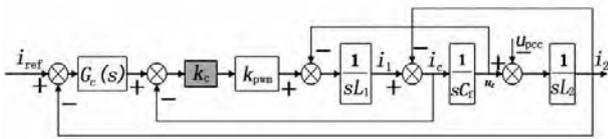


图4 光伏逆变器电流环框图

各逆变器等效输出阻抗  $Z_s$  等于输出电流  $i_2$  与输出电压  $u_{pcc}$  的比值。图5为图4经变换后可反映  $u_{pcc}$  与  $i_2$  的传递函数关系的框图。根据图5可计算逆变器的等效输出阻抗  $Z_s$ , 如式(2)所示。

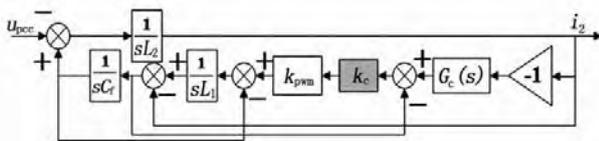


图5 输出电压与输出电流的传递函数关系

$$Z_s = \frac{1}{Y_s}$$

$$Y_s = \frac{I_2}{u_{pcc}} = -\frac{G_2 + G_1 G_2 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf}}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} G_c k_{pwm} k_c} \quad (2)$$

$G_{eq}$  代表着简化后等效诺顿电源系数, 如式(3)所示。

$$G_{eq} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_{0.27}} \cdot G_s \quad (3)$$

$Z_{eq}$  代表着简化后诺顿电源并联等效阻抗, 如式(4)所示。

$$Z_{eq} = \frac{(Z_s + Z_{0.27}) \cdot Z_{0.27M}}{Z_s + Z_{0.27} + Z_{0.27M}} \quad (4)$$

$Z_{g-eq}$  代表着简化后网侧戴维南电路的等效串联阻抗, 如式(5)所示。

$$Z_{g-eq} = (Z_g \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p \parallel Z_{35M} + Z_{35} \quad (5)$$

$G_{g-eq}$  代表着戴维南等效后的网侧等效电源系数, 如式(6)所示。

$$G_{g-eq} = \frac{Z_{35M} \parallel Z_p}{Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L} \cdot \frac{(Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p}{(Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p + Z_g} \quad (6)$$

考虑  $n$  台发电单元并网运行的情况, 利用节点电压法可对图3中的节点电压  $U_o$  进行求解。节点电压方程如式(7)所示。

$$\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} U_o + Y_{g-eq} U_o = \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i} + Y_{g-eq} G_{g-eq} U_g \quad (7)$$

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(8):

$$I_{o,j} = G_{eq,j} I_{ref,j} - Y_{eq,j} U_o \quad (8)$$

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

$$I_{o,j} = \left( G_{eq,j} - \frac{Y_{eq,j} G_{eq,j}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,j} - \left( \frac{Y_{eq,j} \sum_{i=1}^n G_{eq,i}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,i} - \left( \frac{G_{g-eq} Y_{eq,j} Y_{g-eq}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) U_g \quad (9)$$

式(9)分为3个部分, 可以看出发电单元输电电流受自身参考电流、其他并联发电单元参考电流以及电网电压3个因素影响。

对于集中式光伏电站,更关注其入网电流  $I_g$  的情况,因此对式(9)的  $I_{0,j}$  进行求和得

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} - \left( \frac{G_{g-eq} Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} \right) U_g \quad (10)$$

假设各发电单元完全一致,则式(10)可简化为式(11):

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} n G_{eq,i} I_{ref}}{Y_{g-eq} + n Y_{eq}} - \frac{G_{g-eq} n Y_{eq} Y_{g-eq}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} U_g \quad (11)$$

式(11)与式(8)类似,均为  $I_g = G I_{ref} - Y U_g$  形式,说明入网电流  $I_g$  受集中式电站等效系数  $G$  和电站与电网等效耦合导纳  $Y$  的影响,在系统阻抗模型中,考虑 50 MVA 集中式光伏电站的情况,即台数  $n$  将固定,那么  $G$  和  $Y$  与传输线路阻抗有关,即受传输线路长度的影响。

## 2 谐波放大机理分析

利用 Matlab 对前面已建立的集中式等效电源系数  $G$  和电站与电网等效耦合导纳  $Y$  进行频域分析,思路是不断改变输电线路长度,可以得到一系列系数  $G$  和  $Y$  的幅频响应曲线,然后利用绘图工具将曲线簇放在同一坐标轴系内,绘制出等效电源系数  $G$  和电站与电网等效耦合导纳  $Y$  随输电线路长度变化的幅频响应特性图。仿真算法流程图如图 6 所示。

图 7 为系数  $G$  和  $Y$  随输电线路长度变化的幅频响应图。

图 7 说明了 3 点: 1) 谐振尖峰频率点会随着线路长度增加而向低频段移动; 2) 输电线路的分布电容效应会使得同一线路长度下系统产生多个谐振点,体现为图 7 中的环形带; 3) 等效电源系数  $G$  对入网电流的影响远高于等效耦合导纳  $Y$  的影响,电网电压通过等效耦合导纳  $Y$  对入网电流施加的影响较小。根据幅频响应图,可以大致得到响应幅值与频率和长度的对应关系,比如在 60 km 馈线长度与 19 次谐波处存在一个谐振尖峰,说明该电站模型网侧的 19 次左右的谐波电流含量将受到较大程度的增加。

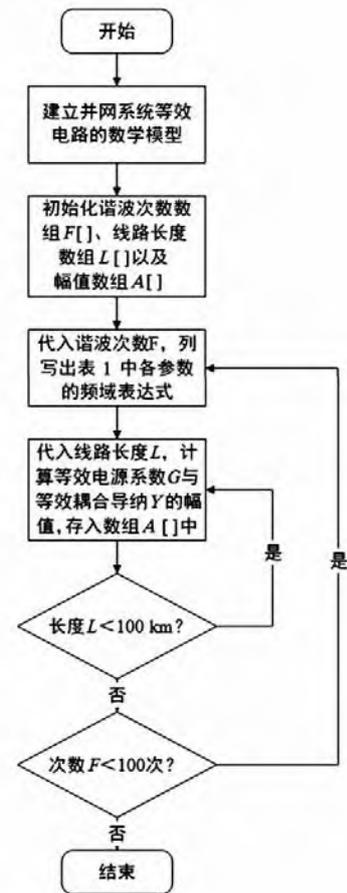
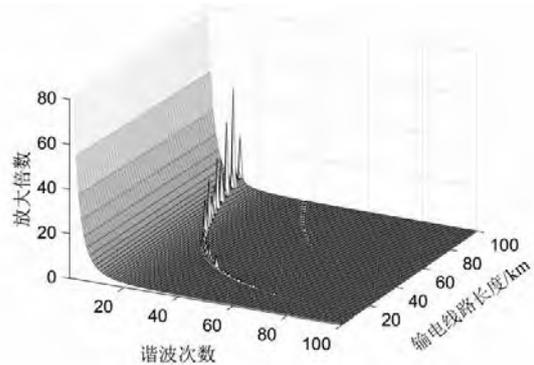
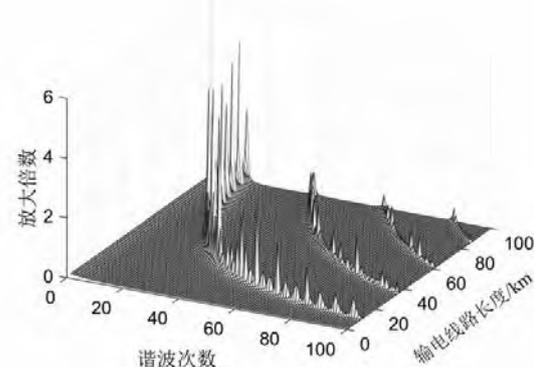


图 6 仿真计算流程



(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 7 系数  $G$  和  $Y$  随输电线路长度变化的幅频响应

### 3 仿真对照分析

为了更好地说明集中式光伏电站输出谐波放大的问题,按照图8的结构在Simulink中搭建容量为50 MVA的电站仿真模型。

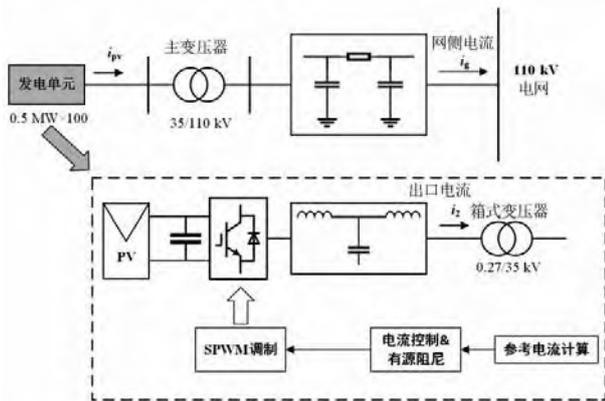


图8 光伏电站仿真模型结构

图9为单个发电单元仿真模型的控制结构。该模型的发电单元为单级三相LCL逆变器,采用电容电流反馈阻尼以及网侧电流闭环控制,由电压外环提供电流环给定值。

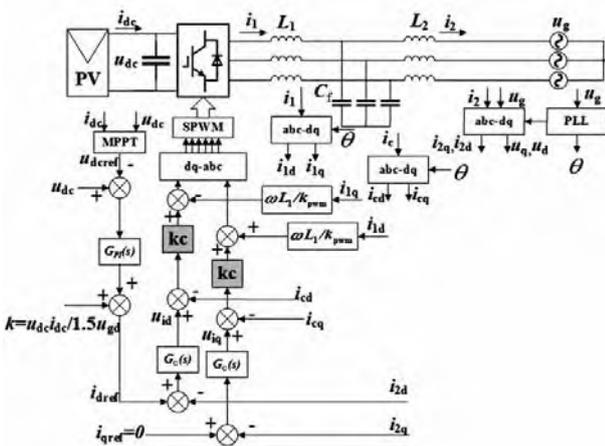


图9 光伏逆变器的控制策略

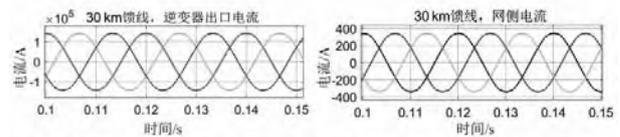
光伏电池组采用Simulink中由ISoltech厂商提供的模型,型号为ISTH-220-P,单块额定功率219 W,最大功率点电压29.3 V,最大功率点电流7.47 A,开路电压36.6 V,短路电流7.97 A,串联单元19个,并联单元120个。MPPT采用定电压跟踪策略,使直流母线电压 $U_{dc}$ 维持在最大功率点557 V左右。发电单元相关参数如表2所示。

假设各发电单元完全一致,那么可以将50 MVA的电站模型进行单机等值,以便在Simulink中运行。通过仿真,可以得到不同线路长度下,逆变器出

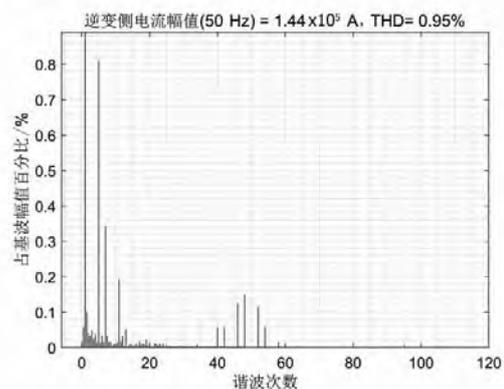
表2 仿真参数设置

参数	值
开关频率	$f_s = 2.5 \text{ kHz}$
直流母线电压 $U_{dc}$	557 V
单台逆变器功率 $P$	500 kW
发电单元箱式变压器	0.27/35 kV, yn - D11
主变压器	35/110 kV, Yn - d11
	$L_o = 1.2 \text{ mH}$
输电线路(1 km)	$r_o = 0.053 \Omega$
	$c_o = 12.9 \text{ nF}$
	$L_1 = 0.24 \text{ mH}$
LCL滤波器	$L_2 = 0.08 \text{ mH}$
	$C_f = 220 \mu\text{F}$
直流稳压电容	5100 $\mu\text{F}$
电流环PI控制器	$k_p = 0.2, k_i = 50$
电压环PI控制器	$k_p = 2, k_i = 10$

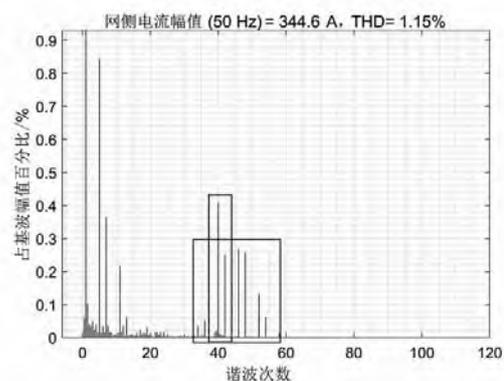
口电流与网侧电流的波形与频谱分析。图10至图12分别为30 km、60 km、80 km时的仿真结果。



(a) 线路长度30 km时逆变器出口电流 (b) 线路长度30 km时网侧电流

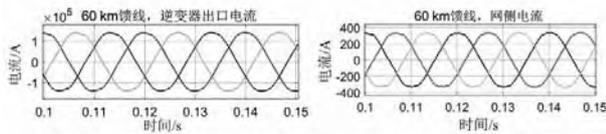


(c) 线路长度30 km时逆变器出口电流频谱

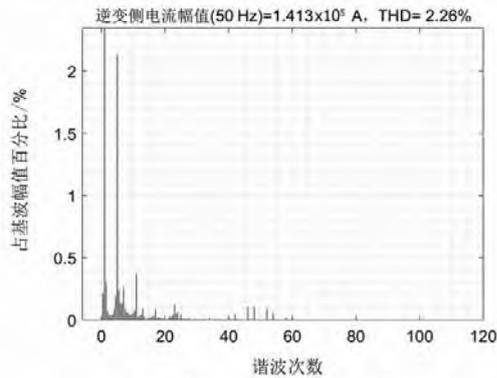


(d) 线路长度30 km时网侧电流频谱

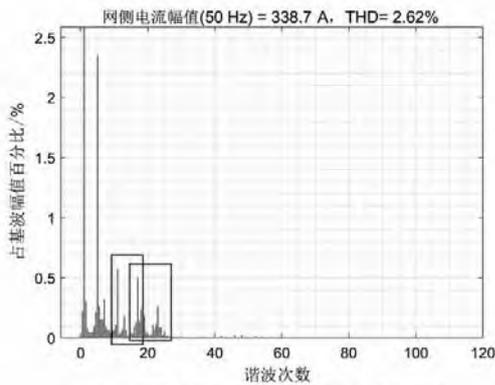
图10 线路长30 km时仿真结果



(a) 线路长度60 km时逆变器出口电流 (b) 线路长度60km时网侧电流



(c) 线路长度60 km时逆变器出口电流频谱



(d) 线路长度60 km时逆变器出口电流频谱

图11 线路长度60 km时仿真结果

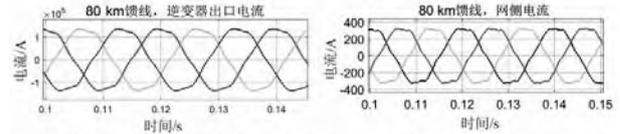
从图10至图12可以看出,谐波电流在传输过程中普遍存在放大现象,不同长度的线路影响着不同频率的谐波,且影响程度也不同。在网侧电流频谱中标注出了被明显放大的谐波,其频率位置与图7幅频响应图大致对应。

以图11线路长度为60 km时的仿真结果为例进行分析,从图11(d)可以看出,受到较明显放大的网侧谐波电流频率主要在11~23次谐波。下面将仿真波形与第2节幅频响应曲线图进行对照。

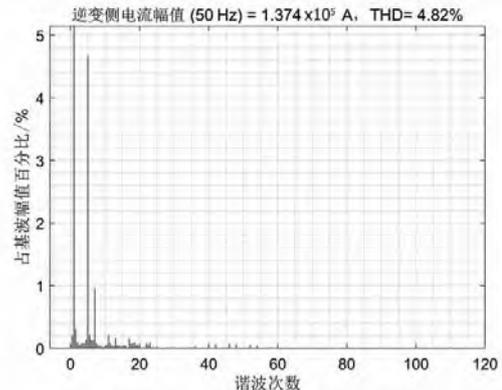
表3给出了图7中线路长度为60 km时等效电源系数G和等效耦合导纳Y的响应幅值。

表3说明了当输电线路为60 km长度时,系统的谐振尖峰处在11、13、17、19、21、23次,其中最高谐振尖峰处在19次。

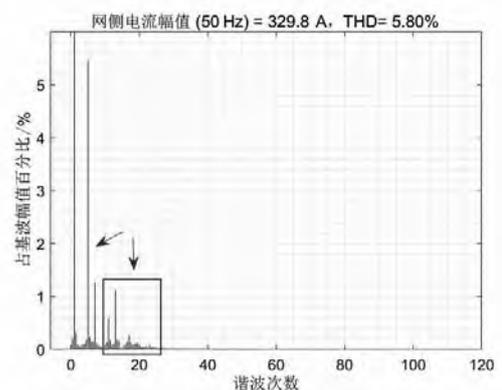
表4给出了在线路长度为60 km的情况下,逆变器出口电流与网侧电流中处在该频次范围的谐波电流含量。



(a) 线路长度80 km时逆变器出口电流 (b) 线路长度80 km时网侧电流



(c) 线路长度80 km时逆变器出口电流频谱



(d) 线路长度80 km时网侧电流频谱

图12 线路长80 km时仿真结果

表3 等效电源系数G和等效耦合导纳Y  
幅频响应幅值

谐波次数	系数G	系数Y
11	4.318 8	0.056 3
13	3.020 1	0.062 6
17	1.193 4	0.146 6
19	12.002 1	1.982 2
21	1.848 4	0.107 4
23	1.328 6	0.051 5

表4 逆变器出口电流与网侧电流中  
各次谐波的含量

谐波次数	逆变侧谐波含量/%	网侧谐波含量/%	放大倍数
11	0.38	0.57	1.50
13	0.09	0.19	2.11
17	0.09	0.50	5.56
19	0.02	0.18	9.00
21	0.01	0.03	3.00
23	0.13	0.26	2.00

从表4可以看出,线路长60 km时,17、19、21次谐波的放大倍数较为突出,其中19次谐波放大程度最严重,这与表3的结果相符,但是11、17次谐波的放大倍数与表3结果相比偏大,可能是由于在建立Simulink光伏电站开关仿真模型时,控制器效果不够理想导致的谐波含量数值上的偏差。

## 4 结 语

以50 MVA的集中式光伏电站为研究对象,建立了集中式光伏电站的等效阻抗模型,并在阻抗模型基础上研究谐波电流放大的机理。得出以下结论:

1) 集中式光伏发电系统的谐振频率会随着传输线路长度的增加而逐渐向低频偏移,输电线路的分布式电容会使得系统幅频响应出现环形谐振尖峰带。

2) 系统阻抗模型可以简化为  $I_g = GI_{ref} - YU_g$  形式,仿真分析表明谐波电流受等效电源系数  $G$  和等效耦合导纳  $Y$  的影响,幅频响应图中的尖峰频率对应着受到严重放大的谐波电流频率。

3) 在后续研究抑制策略时,可通过改变系统阻抗模型中的等效电源系数  $G$  和等效耦合导纳  $Y$ ,抑制幅频响应图中的尖峰,就能使系统谐波电流含量降低。可从外接滤波装置以达到系统阻抗重塑,亦或直接改变逆变器控制策略从而修改等效电源系数  $G$  两个方向进行研究。

### 参考文献

[1] 国家能源局. 国家能源局关于2019风电、光伏发电项目建设有关事项的通知[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2019-05/30/c\\_138102795.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-05/30/c_138102795.htm).

[2] Sun Jian. Impedance-based Stability Criterion for Grid-connected Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(11):3075-3078.

[3] 谢宁,罗安,陈燕东,等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):10-17.

[4] 谢宁,罗安,马伏军,等. 大型光伏电站与电网谐波交

互影响[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):9-16.

[5] 陈祥,潘基书. 光伏电站组件串联数的优化设计[J]. 云南电力技术,2018,46(5):1-2.

[6] 匡慧敏,罗安,陈智勇,等. 多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J]. 电网技术,2016,40(4):1180-1189.

[7] 陈智勇,黄旭程,杨芬,等. 分布式电站宽频域谐振机理分析及阻抗协调构造方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):141-154.

[8] Zhiyong Chen, Yangdong Chen, Josep M., et al. Generalized Coupling Resonance Modeling, Analysis, and Active Damping of Multi-parallel Inverters in Microgrid Operating in Grid-connected Mode[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016,4:63-75.

[9] 许德志,汪飞,阮毅,等. 多逆变器并网系统阻抗建模与谐波交互[J]. 电机与控制学报,2014,18(2):1-7.

[10] 许德志,汪飞,毛华龙,等. 多并网逆变器与电网谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):64-71.

[11] 杨明. 大型光伏电站逆变器并网控制策略及稳定性分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[12] 帅智康,肖凡,涂春鸣,等. 宽频域谐波谐振劣化机理及其抑制措施[J]. 电工技术学报,2013,28(12):16-23.

[13] 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.

[14] 郑晨. 集中式大型光伏并网系统谐振机理及谐振抑制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[15] 周林,张密. 大型光伏电站谐振现象分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):8-14.

### 作者简介:

王若瀚(1997),硕士研究生,研究方向为光伏发电系统稳定性;

郑连清(1964),博士,教授,主要研究方向为电力电子技术,在电力系统中的应用等。

(收稿日期:2020-03-25)

# 欢迎投稿

# 欢迎订阅

投稿邮箱:cdscdljs@163.com