

考虑电缆宽频特性的光伏电站谐振机理及抑制

俞容江¹, 马 炯¹, 李家栓¹, 全 宇²

(1. 杭州市电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310014;
2. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 电缆对地电容不可忽视, 易引发电缆传输电能的光伏电站发生谐波谐振, 危及电站安全运行。针对此, 以光伏电站中并网发电单元为研究对象, 从光伏发电单元闭环控制的角度揭示与电缆相连的光伏电站的谐振机理。研究表明: 考虑电缆宽频域特性, 光伏并网发电控制系统闭环传递函数存在多个幅值尖峰, 使得其输出电流、公共耦合点电压及电流发生谐波畸变。分析了电缆长度、并网台数等对谐振的影响。进一步提出基于宽频相位补偿的谐振抑制策略, 削弱系统传递函数尖峰值, 从而达到抑制谐振、减小谐波的目的。最后仿真结果验证了所提策略的有效性。

关键词: 光伏电站; 谐波谐振; 电缆; 谐振抑制

DOI: 10. 12067/ATEEE1908045 **文章编号:** 1003-3076(2020)10-0047-08 **中图分类号:** TM46

1 引言

随着清洁能源的推广和倡导, 光伏电站等新能源电站的建设日显重要, 其与电网的交互影响越来越深^[1]。而光伏电站一般远离城市中心, 其发出的电能需通过较长的输电线或电缆传输至公共电网^[2,3]。尤其对于电缆, 其对地电容较大, 可与电站中的感性元件形成感容耦合, 形成谐振电路^[4,5], 在光伏逆变器注入的谐波电流激励下, 引发谐波谐振现象^[6,7]。从而产生严重的谐波电压和电流, 增加电网谐波损耗, 降低电站的输出电能质量, 甚至引起电站跳闸。随着光伏能源渗透率逐年升高, 研究光伏电站谐波谐振形成机理、影响因素和抑制技术, 以避免电站谐振、保证安全性和电能质量十分必要。

文献[8-11]针对光伏电站谐振开展了研究。文献[8]推导出一种基于系统导纳的大型光伏电站稳定性判据, 指出电网阻抗增加降低了系统稳定性甚至引发谐波谐振, 并提出将并网点电压反馈的导纳重构策略以抑制谐振。文献[9]将电网阻抗对大型光伏电站的影响等效转换为对各台逆变器的影响, 分析了等效电网阻抗对系统有源阻尼及稳定裕度的

影响, 并采用超前环节以补偿系统相位从而抑制谐振。为研究谐振形成的关键因素, 文献[10,11]分别从输入导纳判据和闭环控制的角度, 分析控制参数、总时间延迟、无源阻尼和网侧电感等对谐波不稳定的影响规律。以上文献均研究了电网阻抗和光伏电站的交互影响, 指出电网阻抗与谐振形成的关系。然而均采用输电线路的集中参数模型, 并仅考虑其感抗而忽视其容抗。而对于电缆, 其对地电容较大, 当电缆长度较长且考虑的谐波频率较高时, 集中参数模型与实际存在较大差异^[12]。因此, 针对电缆传输电能的光伏电站, 其谐波谐振的机理研究中应考虑电缆宽频域特性。

本文首先研究电网侧阻抗对光伏电站中单台发电单元的等效影响, 并采用分布参数模型建立含电缆的电网侧阻抗模型; 其次通过分析并网发电单元控制系统的闭环传递函数, 研究谐振机理, 分析电缆参数、并网台数等对谐振的影响; 再次根据分析的谐振频域, 设计基于切比雪夫带通滤波器的相位补偿环节, 超前补偿宽频谐振频域的系统相位, 减小系统闭环传递函数相应频段尖峰值, 从而抑制谐振; 最后在 MATLAB/Simulink 中建立光伏电站仿真模型, 验证

收稿日期: 2019-08-18
基金项目: 浙江省自然科学基金/青年基金项目(LQ18E070001)
作者简介: 俞容江(1974-), 男, 浙江籍, 高级工程师, 本科, 研究方向为电力系统自动化;
全 宇(1986-), 女, 壮族, 广西籍, 讲师, 博士, 研究方向为新能源发电与并网(通讯作者)。

谐振机理分析的正确性和抑制策略的有效性。

2 光伏电站系统建模

2.1 光伏电站等效模型

图1所示为某光伏电站拓扑结构,电站由 n 台50kW光伏发电单元并联在公共耦合点(PCC)处后通过电缆接入公共电网。单台光伏发电单元由光伏阵列、LCL滤波型三相逆变器桥、0.4 kV/10 kV 变压器组成。 L_1 、 L_2 、 C_f 和 R_f 分别为逆变器侧滤波电感、网侧滤波电感、滤波电容及等效电阻。

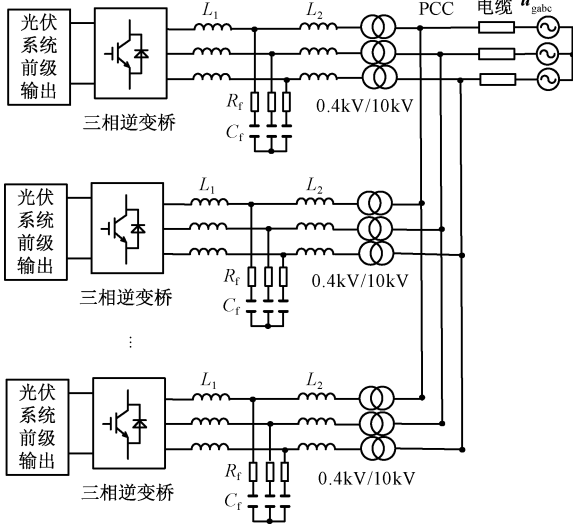


图1 光伏电站拓扑结构

Fig.1 Topology of photovoltaic plants

文献[13]通过建立单台光伏发电单元的诺顿模型,证明了 n 台光伏发电单元并联连至电网,对于单台发电单元相当于电网侧阻抗放大了 n 倍。设包括电缆及公共电网的电网侧阻抗为 Z_s ,变压器漏电感为 L_t ,则单台光伏发电单元并网的等效电路模型及其控制框图如图2所示。前级DC/DC变换器主要实现最大功率追踪,对由于逆变器阻抗引起的谐振影响甚微,在本文分析中忽略。逆变器采用典型矢量控制,通过坐标变换将网侧电流、网侧电压变换至dq坐标下,通过电流环PI控制器调节网侧电流。

2.2 单台并网单元模型

根据图2,可得单台并网光伏发电单元复频域数学模型如图3所示。图3中 G_{pi} 为电流环PI控制器传递函数, $G_{pi}(s) = k_p + k_i/s$, k_p 、 k_i 分别为比例系数和积分系数; i_{2rdq} 、 i_{2dq} 、 u_{2dq} 、 v_{cdq} 分别为网侧电流参考值、网侧电流、网侧电压、解耦补偿项在dq旋转坐标系下的d、q轴分量, $T_v = L\omega_0 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, $L = L_1 + L_2$,

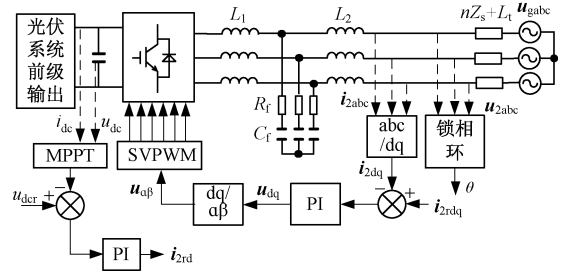


图2 单台光伏并网发电单元等效电路及其控制框图

Fig.2 Equivalent circuit model and control loops of a grid-connected PV power system

$\omega_0 = 2\pi f_0 = 100\pi$; $i_{2r\alpha\beta}$ 、 $i_{2\alpha\beta}$ 、 $i_{1\alpha\beta}$ 、 $u_{2\alpha\beta}$ 、 $u_{c\alpha\beta}$ 和 $i_{c\alpha\beta}$ 分别为网侧电流参考值、网侧电流、逆变器侧电流、网侧电压、滤波电容电压、滤波电容电流在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的 α 、 β 轴分量。 $G_{s/c}$ 为dq旋转坐标系到 $\alpha\beta$ 静止坐标系的闭环传函矩阵, $G_{s/c}$ 为 $\alpha\beta$ 静止坐标系到dq旋转坐标系的闭环传函矩阵,均涉及锁相环输出相位,体现了锁相环对系统控制性能的影响,具体为^[14]:

$$G_{s/c}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 + T_{pll}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$G_{c/s}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - T_{pll}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{pll}(s) = u_{2d} G_{pll}(s) / [s + u_{2d} G_{pll}(s)] \quad (3)$$

式中, u_{2d} 为网侧电压d轴分量; $G_{pll}(s)$ 为锁相环PI控制器传递函数, $G_{pll}(s) = k_{pll p} + k_{pll i}/s$, $k_{pll p}$ 、 $k_{pll i}$ 分别为比例系数和积分系数。令 $Z_{cf} = R_f + 1/(sC_f)$, $Z_1 = R_1 + sL_1$, $Z_2 = R_2 + s(L_2 + L_t) + nZ_s$,单台光伏并网单元闭环传函矩阵 $G_b(s)$ 为:

$$G_b(s) = \begin{bmatrix} G_{\alpha\alpha} & G_{\alpha\beta} \\ G_{\beta\alpha} & G_{\beta\beta} \end{bmatrix} = G_s(s) G_{s/c}(s) G_{c/s}(s) \cdot$$

$$[1 + (1 - T_v/G_{pi}) G_s(s) G_{s/c}(s) G_{c/s}(s)]^{-1} \quad (4)$$

忽略微小项,令 $T_x(s) = [1 - T_{pll}(s)][1 + T_{pll}(s)]$, $G_s(s) = [Z_{cf} G_{pi}(s)] / (Z_{cf} Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_{cf} Z_2)$,求解可得:

$$G_{\alpha\alpha}(s) \approx \frac{G_s(s)}{1 + G_s(s)} \quad (5)$$

$$G_{\alpha\beta}(s) \approx \frac{-L\omega_0 G_s(s)}{[1 + G_s(s)][1 + G_s(s) T_x(s)]} \quad (6)$$

$$G_{\beta\alpha}(s) \approx \frac{L\omega_0 G_s(s) T_x(s)}{[1 + G_s(s)][1 + G_s(s) T_x(s)]} \quad (7)$$

$$G_{\beta\beta}(s) \approx \frac{G_s(s) T_x(s)}{1 + G_s(s) T_x(s)} \quad (8)$$

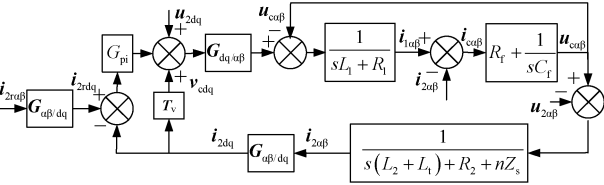


图3 单台光伏并网发电单元复频域数学模型

Fig.3 Mathematic model of a grid-connected PV power system in complex frequency domain

图4所示为锁相环PI控制参数不同下的闭环传递函数 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 、 $G_{\alpha\beta}(s)$ 、 $G_{\beta\alpha}(s)$ 、 $G_{\beta\beta}(s)$ 的幅频特性图。其中, $l=20\text{ km}$, $n=12$,电缆型号为IJ-70,光伏并网发电单元参数如表1所示, k_{plp} 和 k_{pli} 分别按80和20,280和70,480和120,680和170增大。从式(5)和图4可见,锁相环对系统闭环传递矩阵 $G_b(s)$ 的影响为:① $G_{\alpha\alpha}(s)$ 不受锁相环影响;②锁相环仅对 $G_{\alpha\beta}(s)$ 、 $G_{\beta\alpha}(s)$ 和 $G_{\beta\beta}(s)$ 的低频段特性产生影响,不影响其中高频段特性;③中高频段, $G_{\alpha\alpha}(s)$ 和 $G_{\beta\beta}(s)$ 幅频特性重合, $G_{\alpha\beta}(s)$ 和 $G_{\beta\alpha}(s)$ 幅频特性重合;④中高频段, $G_{\alpha\alpha}(s)$ 和 $G_{\alpha\beta}(s)$ 幅值不同而形状相同。这是由于一般参数下的锁相环,仅影响逆变器低频段阻抗^[14]。对于上述系统,可认为 $T_x(f>0.5\text{ kHz})\approx 1$ 。而本文研究谐振一般发生在中高频段,因此可略去锁相环的影响,认为 $T_x(s)\approx 1$, $G_{\alpha\alpha}(s)\approx G_{\beta\beta}(s)\approx G_{\beta\alpha}(s)/(L\omega_0)\approx -G_{\alpha\beta}(s)/(L\omega_0)$ 。为简化分析,下文仅通过传递函数 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 分析电缆传输电能的光伏电站谐波谐振。

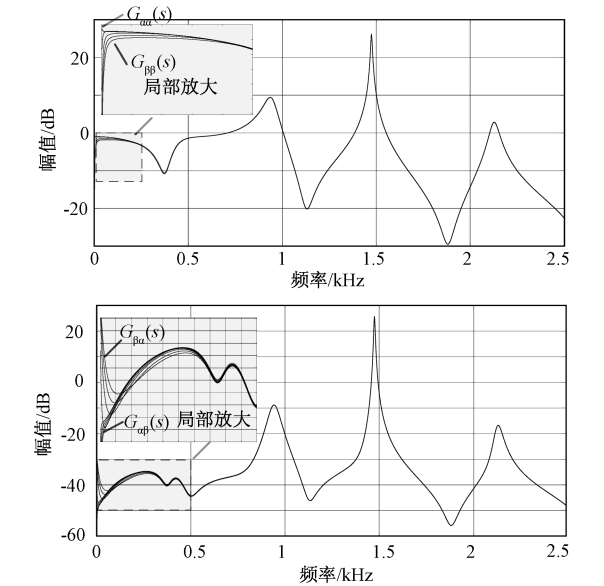


图4 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 、 $G_{\alpha\beta}(s)$ 、 $G_{\beta\alpha}(s)$ 、 $G_{\beta\beta}(s)$ 幅频特性图

Fig.4 Amplitude-frequency curve of $G_{\alpha\alpha}(s)$ 、 $G_{\alpha\beta}(s)$ 、 $G_{\beta\alpha}(s)$ 、 $G_{\beta\beta}(s)$

表1 光伏发电单元参数					
Tab.1 Parameters of PV power system					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
k_p	1.5	L_1/mH	0.1	$C_f/\mu\text{F}$	440
k_i	8	L_2/mH	0.05	R_f/Ω	0.1

2.3 电网侧阻抗模型

电网侧包括电缆及公共电网。考虑电缆的对地电容较大而不能忽视,采用电缆的分布参数模型。设 r_0 、 l_0 、 c_0 分别为单位长度电缆的电阻值、电感值和电容值, l 为电缆长度, L_g 为公共电网线路电感,则折算至变压器低压侧,电网侧阻抗为^[12]:

$$Z_s = \frac{Z_L s L_g \cdot \text{ch}(\gamma l) + Z_L \cdot \text{sh}(\gamma l)}{k_1^2 Z_L \cdot \text{ch}(\gamma l) + s L_g \cdot \text{sh}(\gamma l)} \quad (9)$$

式中, γ 为电缆的传播系数, $\gamma = \sqrt{(r_0 + s l_0) s c_0}$; Z_L 为电缆的特性阻抗, $Z_L = \sqrt{(r_0 + s l_0) / (s c_0)}$; k_1 为0.4 kV/10 kV变压器高低压匝比。根据式(9),电网侧阻抗 Z_s 在频域上交替表现为感性/容性,感性/容性交替点频率随电缆长度增加而减小,在容性区间 Z_s 从极小值变化到极大值,在感性区间 Z_s 从极大值变化到极小值^[2]。若忽略电缆的对地电容, $Z_s = [s L_g + l(r_0 + s l_0)] / k_1^2$,则电网侧阻抗在频域上始终表现为阻感性。两种情况下,电网侧阻抗的频率扫描图如图5所示。

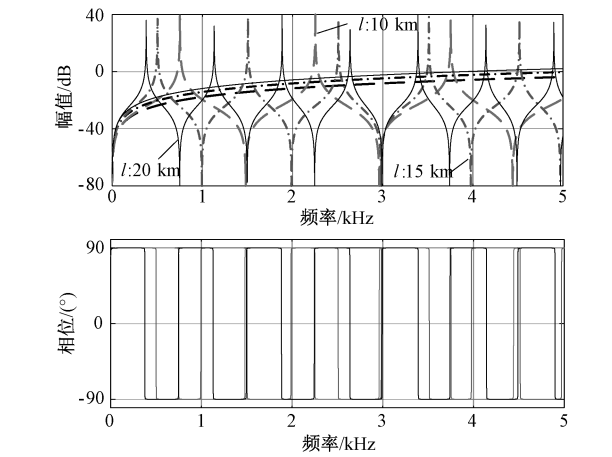


图5 Z_s 阻抗扫描曲线

Fig.5 Impedance scan curve of Z_s

3 谐波谐振形成机理

由式(5)可知,电网侧阻抗影响单台光伏并网发电单元的运行特性和稳定性。选取10 kV电缆型号为IJ-70,其 $r_0=0.46\text{ }\Omega/\text{km}$ 、 $l_0=1.27\text{ mH}/\text{km}$ 、 $c_0=0.86\text{ }\mu\text{F}/\text{km}$,长度为 l ,公共电网等效电感 $L_g =$

0.131 3 mH。并设电站中每台光伏发电单元型号参数一致,如表 1 所示,下文中 k_{plp} 、 k_{pli} 分别为 80、20。

图 6 所示分别为考虑及不考虑电缆对地电容下的单台光伏并网发电单元的闭环传递函数 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 的波特图, $l=20\text{ km}$, $n=12$ 。可见,电缆的对地电容对系统闭环传函影响很大。不考虑电缆对地电容,闭环传函仅存在一个主要由 LCL 滤波器引起的尖峰。该尖峰处频率由 LCL 滤波器及电网侧等效感抗决定,可通过逆变器的有源阻尼技术抑制^[15],此处不赘述。计及电缆的对地电容,闭环传函存在多个尖峰,尖峰处频率与 LCL 滤波器、电缆参数及并网台数等有关。可见,在 0~2.5 kHz 频域内,闭环传函尖峰值大于 1;大于 2.5 kHz,尖峰值均小于 1,且随频率增加而降低。尖峰处的幅值增益大于 1 (0dB),即在该频率处谐波被放大;增益越大,谐波放大作用越强,光伏单元输出电流 i_2 中对应频率的谐波放大系数越大。因此可见,电缆对地电容使得系统存在多个谐波放大区,输出电流 i_2 含多个频率谐波;而不计电缆对地电容,将忽视了输出电流 i_2 复杂的多频率谐波畸变情况。

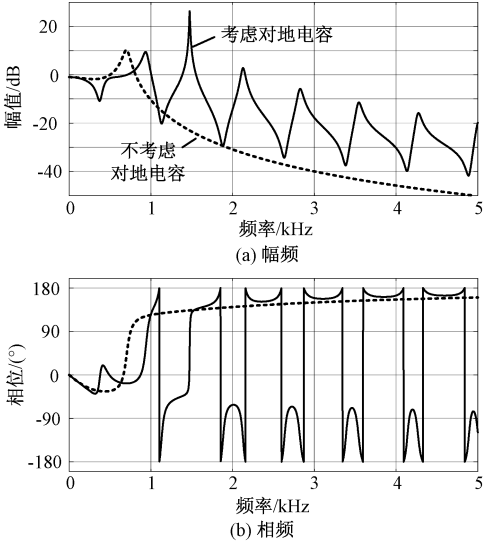


图 6 单台光伏并网发电单元的 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 波特图
Fig.6 Bode diagrams of a grid-connected PV power system's $G_{\alpha\alpha}(s)$

现探讨电缆参数及并网台数与谐波畸变的关系。图 7 所示为电缆分别为 12 km、16 km 和 20 km 时 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 的波特图,图 8 所示为对应电缆长度下的光伏发电单元稳态输出电流 i_2 的 MATLAB 仿真波形及其频谱分析,其中并网台数为 $n=8$,仿真模型见第 5 节。图 7 中, $l=12\text{ km}$,两个增益大于 1 的尖

峰频率分别约为 1.3 kHz 和 2.2 kHz; $l=16\text{ km}$,两个增益大于 1 的谐振峰频率分别约为 1.1 kHz 和 1.75 kHz; $l=20\text{ km}$,存在三个增益大于 1 的尖峰,频率分别约为 0.95 kHz、1.45 kHz 和 2.1 kHz。根据上述分析,则输出电流 i_2 将含尖峰频率附近的谐波。从图 8 可见, $l=12\text{ km}$,输出电流 i_2 中含量最高的谐波频率为 1.2 kHz,并围绕 1.2 kHz 附近存在丰富谐波; $l=16\text{ km}$, i_2 中主要含两个谐波群,分别以 1.1 kHz 和 1.65 kHz 为中心; $l=20\text{ km}$, i_2 中主要含两个谐波群,分别以 0.95 kHz 和 1.45 kHz 为中心。仿真波形中 i_2 的谐波频率及随电缆长度变化规律,与闭环传函分析结果基本相符。值得指出的是,仿真波形中 2.1 kHz 或 2.2 kHz 谐波含量不高,一方面是由于该频率处等效的谐波源激励不大,另一方面是由于系统闭环传函在该尖峰处的增益不高。

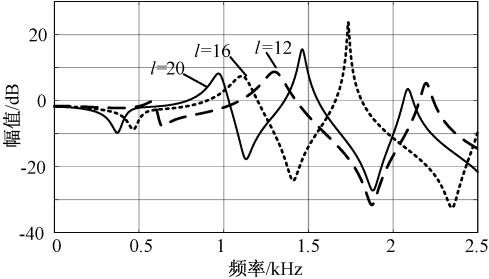


图 7 不同电缆长度的 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 幅频特性图
Fig.7 Amplitude-frequency curve of $G_{\alpha\alpha}(s)$ with different cable length

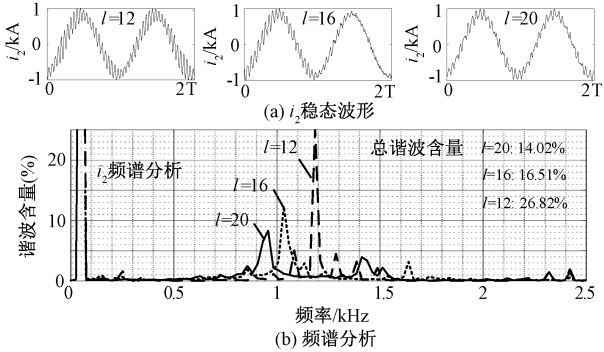


图 8 不同电缆长度的 i_2 稳态波形及频谱分析
Fig.8 Steady waveforms and frequency spectrum of i_2 with different cable length number of parallel machines n

图 9 和图 10 分别为并网台数不同时 $G_{\alpha\alpha}(s)$ 的波特图、光伏发电单元稳态输出电流 i_2 的仿真波形及其频谱分析,其中并网台数依次为 $n=4$ 、8 和 12, $l=20\text{ km}$,仿真系统见下文。从图 9 可见,并网台数改变,系统闭环传函尖峰处频率稍有改变;随着并网

台数增加,第一个尖峰频率 f_{r1} 略微下降,第二个尖峰频率 f_{r2} 略微增加; $f_{r1} \in [0.9 \text{ kHz}, 1.05 \text{ kHz}]$; $f_{r2} \in [1.4 \text{ kHz}, 1.5 \text{ kHz}]$ 。从图 10 可见,输出电流 i_2 中谐波主要集中在两个频段;并网台数 n 按 4、8 和 12 依次增加,第一个谐波频段中心频率 f_{r1} 按 1 kHz、0.95 kHz、0.9 kHz 依次降低,第二个谐波频段中心频率 f_{r2} 按 1.4 kHz、1.43 kHz、1.45 kHz 依次增加;围绕中心频率附近存在丰富谐波。仿真波形中 i_2 的谐波频率及随并网台数变化规律,与闭环传函分析结果基本相符。

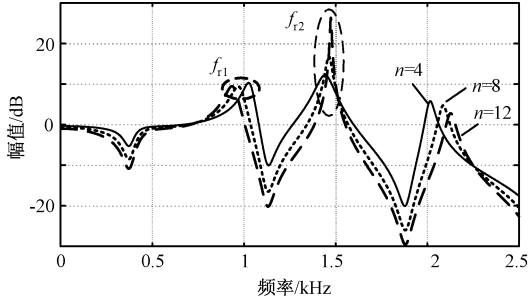


图 9 不同并网台数下的 $G_{\alpha}(s)$ 幅频特性图

Fig.9 Amplitude-frequency curve of $G_{\alpha}(s)$ with different number of parallel machines n

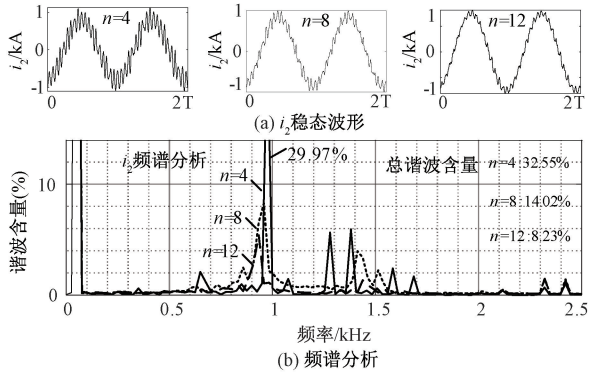


图 10 不同并网台数的 i_2 稳态波形及频谱分析

Fig.10 Steady waveforms and frequency spectrum of i_2 with different

图 11 所示为电网侧阻抗变化时 $G_{\alpha}(s)$ 的幅频特性,其中公共电网等效电感按 0 mH \rightarrow 0.656 5 mH \rightarrow 1.313 mH \rightarrow 1.969 5 mH 依次增大, $n = 8, l = 20$ km,仿真系统见下文。可见,随着电网侧阻抗增加,系统闭环传函尖峰处频率稍有改变;第一个尖峰频率 f_{r1} 和第二个尖峰频率 f_{r2} 均随电网侧阻抗增加而略微下降; f_{r1} 从 0.98 kHz 减小至 0.92 kHz; f_{r2} 从 1.47 kHz 减小至 1.37 kHz。

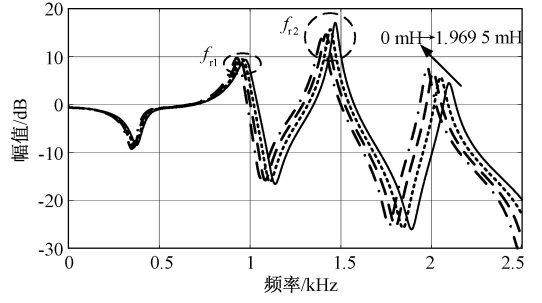


图 11 电网阻抗变动下的 $G_{\alpha}(s)$ 幅频特性图

Fig.11 Amplitude-frequency curves of $G_{\alpha}(s)$ with grid-side impedance variation

4 宽频相位补偿的谐波谐振抑制

由第 3 节可知,考虑实际中电缆较大的对地电容,并网单元的输出电流含多频段谐波;电缆长度一定时,并网台数、电网阻抗的变化会引起谐波频段的略微变化。因此提出一种宽频域相位补偿的谐波谐振抑制策略,以提高谐振频域的相位裕度,减小闭环传函对应频域上的尖峰值,实现对谐波谐振的抑制。值得注意的是,当系统参数的变化过大,使谐振频率超出补偿频域范围时,该策略将失效。

为补偿宽频域相位,而不影响基频控制性能,通过切比雪夫带通滤波器加入相位补偿环节。以 $l = 20$ km 的上述系统为例,其谐振频域 $f_r \in [0.8 \text{ kHz}, 2.4 \text{ kHz}]$ 。考虑参数变化,设计滤波器通带为 0.7~2.5 kHz,通带最大衰耗小于 1 dB,阻带大于 1.6 kHz 时最小衰耗大于 30 dB,具体为:

$$G_{BP}(s) = \frac{\bar{s}^3}{a_6 \bar{s}^6 + a_5 \bar{s}^5 + a_4 \bar{s}^4 + a_3 \bar{s}^3 + a_2 \bar{s}^2 + a_1 \bar{s} + a_0} \quad (10)$$

式中, $G_{BP}(s)$ 为所设计的 6 阶带通滤波器归一化传递函数; $\bar{s} = s / (3 \cdot 200\pi)$; $a_0 \sim a_6$ 为分母多项式系数,设计原则见文献[16]。带通内滤波器相角为 $90^\circ \sim -90^\circ$ 。因此加入‘ s ’,将补偿相位调整为 $180^\circ \sim 0^\circ$,设 k_c 为幅值调节因子,则设计的相位补偿环节 $G_c(s)$ 和输出相位补偿电压 $V_c(s)$ 为:

$$G_c(s) = k_c s G_{BP}(s) \quad (11)$$

$$V_c(s) = i_2(s) \cdot G_c(s) \quad (12)$$

输出相位补偿电压与原矢量控制输出电压相加,作为逆变器输出参考电压,并通过 SPWM 技术控制逆变器开关。如图 12 所示,相位补偿环节小于 0.7 kHz 时幅值衰减很大,补偿前后的 $G_{\alpha}(s)$ 幅频特性基本不变,系统基频控制性能得以保持;在 0.7

~2.5 kHz 通带内补偿环节相位为 $180^\circ \sim 0^\circ$, 滤波器输出超前补偿相位, 提高原开环交截频率点处相位裕度, 减小原闭环尖峰幅值, 可实现谐波谐振抑制。

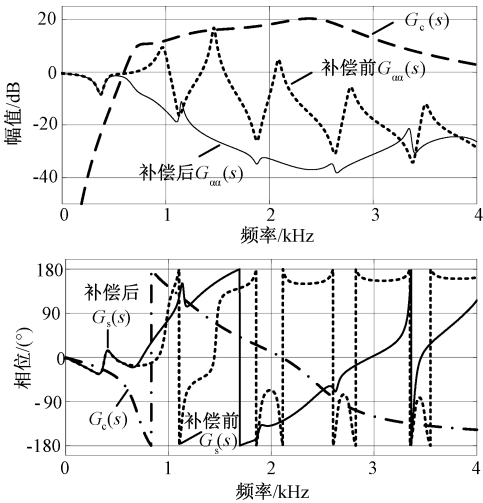


图 12 $G_c(s)$ 波特图、相位补偿前后的 $G_{aa}(s)$ 幅频特性图及 $G_s(s)$ 相频特性图

Fig.12 Bode diagrams of $G_c(s)$, amplitude-frequency curve of $G_{aa}(s)$ and phase-frequency curve of $G_s(s)$ with/without phase compensation

5 仿真验证

为了验证以上分析的正确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了电缆传输的光伏并网发电系统的仿真模型,如图 13 所示。考虑并网台数 n 对电网侧等效阻抗的放大作用,在光伏单元与电网侧之间连接一台变比为 $1:\sqrt{n}$ 的理想变压器。通过该理想变压器,对于光伏单元而言,电网侧阻抗放大了 n 倍。为模拟 5 kHz 内的宽频特性,根据 MATLAB/Simulink/pi section 的设置说明, l km 电缆由 x 个 π 型模型串联形成, $x=\text{取整}[8l\sqrt{l_0c_0}\times 5000]$ 。模型参数与表 1 一致,仿真步长为 $5\text{ }\mu\text{s}$ 。无特别说明,设置光伏单元输出有功功率 50 kW、无功功率为 0 kVar。

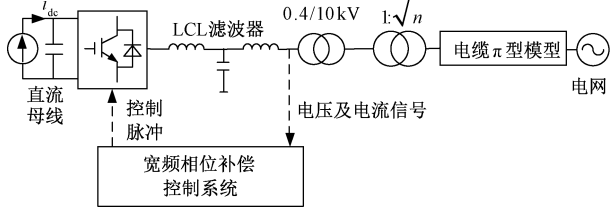


图 13 仿真模型示意图

Fig.13 Schematic diagram of simulation model

图 14 所示为当 $l=20\text{ km}$ 时的仿真波形及频谱分析。在 0.05 s 时刻,使能所提出的多频段谐波抑制技术; $0\sim 0.1\text{ s}, n=4; 0.1\sim 0.15\text{ s}, n=8; 0.15\sim 0.2\text{ s}, n=12$ 。可见, $0\sim 0.05\text{ s}$ 未使能抑制技术,光伏发电系统输出电流 i_2 谐波畸变严重,使得 PCC 点电流 i_{PCC} 和电压 u_{PCC} 畸变严重。PCC 点电压和电流谐波畸变率分别达 20.94% 和 31.12%,特别是 0.95 kHz 谐波分别高达 17.53% 和 26.17%,其次是 1.27 kHz、1.37 kHz、1.57 kHz、1.67 kHz 谐波。此时,直流母线电压高频波动明显,影响直流母线电容寿命;输出有功功率和无功功率脉动较大,光伏电站出力的平稳性降低。当使能抑制技术,逆变器输出电流 i_2 谐波大大减小,使得 PCC 点电流 i_{PCC} 和电压 u_{PCC} 谐波畸变率分别减小为 3.43% 和 3.96%;同时直流母线电压、输出有功功率和无功功率的脉动被大幅减小,直流母线电压、光伏电站出力的平稳性得以保障;PCC 点电压维持较好的正弦度。并网台数增加,PCC 点电流增加;光伏输出电流 i_2 、PCC 点电压和电流始终保持较高的正弦度。这说明所提策略,面对投运台数变化的实际情况,能有效抑制系统谐波,保证电站运行质量。

图 15 为 $l=20\text{ km}, n=8$ 时,功率突变时的仿真波形。图 15 中, 0.05 s 之前未使能谐波抑制, 0.05 s 之后使能谐波抑制; 0.1 s 单台输出有功功率由 50 kW 减少至 25 kW, 0.15 s 单台输出无功功率由 0 kVar 增加至 25 kVar(容性)。从图 15 中可见,所提谐波抑制技术在输出功率突变的情况下依然有效,能使光伏输出电流 i_2 、PCC 点电压和电流始终保持较高的正弦度、直流母线电压和输出功率平稳,适用于电站输出功率变化的实际情况。

6 结论

本文研究电缆传输的光伏电站谐波谐振的形成机理,得到结论:

- (1) 计及电缆的对地电容,包括电缆的电网侧阻抗在频域上交替呈现出感性/容性,使得光伏并网发电系统闭环传递函数存在多个尖峰,引起光伏电站输出电流、公共耦合点电压和电流发生宽频域谐波畸变。
- (2) 本文逆变器控制系统中,常规参数下的锁相环及解耦控制仅对于光伏并网发电系统闭环传递函数的低频特性产生影响,在中高频谐波谐振研究中可忽略。

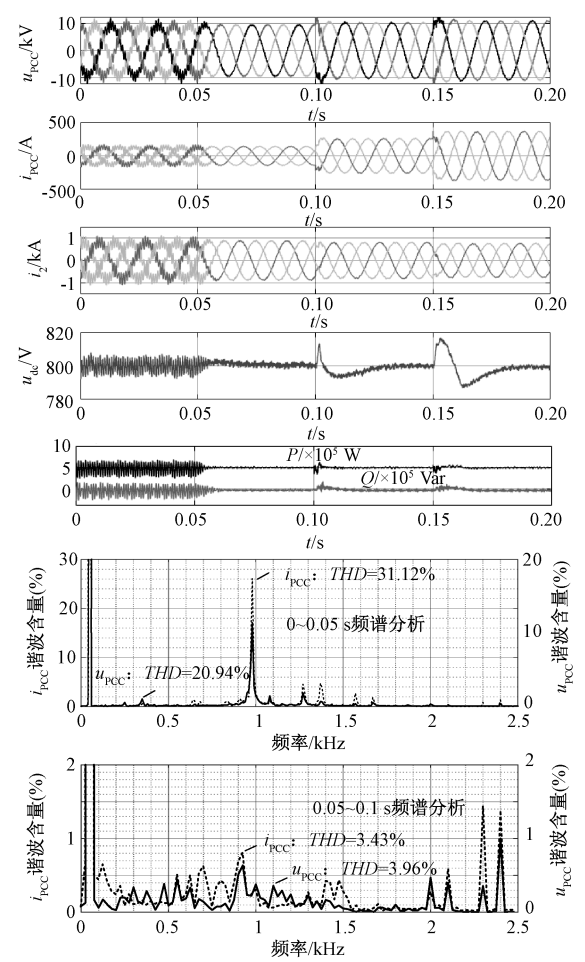


图 14 $l=20$ km 时仿真波形及频谱分析

Fig.14 Simulation results and frequency spectrum with point $l=20$ km

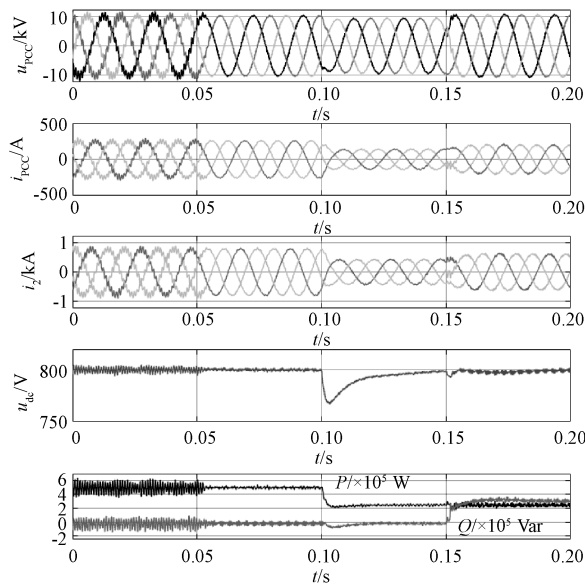


图 15 功率突变时的仿真结果

Fig.15 Simulation results with power variation

(3)谐波谐振频率受电缆长度、并网台数、电网阻抗等影响。当电缆长度改变时,电网侧阻抗极大值、极小值频率变化大,使得电缆传输的光伏电站谐波谐振频率改变较大。并网台数及电网阻抗的变化,使系统谐波谐振频率略变化。

(4)提出基于宽频相位补偿的光伏逆变器谐振抑制策略,通过设计基于切比雪夫带通滤波器的相位补偿环节,超前补偿宽频谐振频域的系统相位,能显著减小系统闭环传函相应频段尖峰值,从而达到抑制谐振、削减谐波的目的。

参考文献 (References):

[1] 冯晓丽 (Feng Xiaoli). 光伏储能电站的经济性分析 (Economical analysis of photovoltaic power station with battery energy storage system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (9): 52-58.

[2] Zhang S, Lu X, Ge B, 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.

[3] Shuai Z K, Liu D, Shen J, et al. Series and parallel resonance problem of wideband frequency harmonic and its elimination [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (4): 1941-1952.

[4] 聂程,王跃,雷万钧,等 (Nie Cheng, Wang Yue, Lei Wanjun, et al.). 新能源并网输电电缆谐波谐振分析及抑制方法 (Harmonic resonance analysis and suppression method for transmission cable between renewable energy sources and power grid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (17): 128-133.

[5] 陈甜甜,胡蓉,金祖洋,等 (Chen Tiantian, Hu Rong, Jin Zuyang, et al.). 邻近直流输电落点的城市电网谐波传导特性分析 (Analysis research on harmonic transmission characteristics of urban power network adjacent to UHVDC terminal location) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (10): 3000-3004.

[6] 周林,张密 (Zhou Lin, Zhang Mi). 大型光伏电站谐振现象分析 (Analysis of resonance phenomenon in large-scale photovoltaic power plant) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 34 (6): 8-14.

[7] 谢宁,罗安,马伏军,等 (Xie Ning, Luo An, Ma Fu-jun, et al.). 大型光伏电站与电网谐波交互影响 (Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power

- stations and grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (34): 9-16.
- [8] 郑晨, 周林, 张密 (Zheng Chen, Zhou Lin, Zhang Mi). 基于导纳重构的大型光伏电站谐波谐振抑制策略 (Harmonic resonance suppression based on admittance reshaping for large-scale PV plant) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (8): 51-57.
- [9] 郑晨, 周林, 解宝, 等 (Zheng Chen, Zhou Lin, Xie Bao, et al.). 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略 (The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (19): 85-96.
- [10] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等 (Zhu Xiaojuan, Hu Haitao, Tao Haidong, et al.). 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律 (The mechanism and influence of harmonic instability for photovoltaic grid-connected system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (10): 33-41.
- [11] 杨明, 杜少通, 郑征, 等 (Yang Ming, Du Shaotong, Zheng Zheng, et al.). 大规模光伏并网系统谐振机理及稳定性分析 (Resonance mechanism and stability analysis of large scale grid connected photovoltaic system) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2019, 17 (1): 53-61.
- [12] 帅智康, 肖凡, 涂春鸣, 等 (Shuai Zhikang, Xiao Fan, Tu Chunming, et al.). 宽频域谐波谐振劣化机理及其抑制措施 (Resonance degradation mechanism of wide-band frequency harmonics and the elimination strategy) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (12): 16-23.
- [13] 陈新, 张畅, 王赟程 (Chen Xin, Zhang Yang, Wang Yuncheng). 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响 (A study of dynamic interaction between PV grid connected inverters and grid based on the impedance analysis method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 4559-4567.
- [14] Song Y P, Blaabjerg F. Analysis of middle frequency resonance in DFIG system considering phase locked loop [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33 (1): 343-356.
- [15] 梁毅, 谢运祥, 关远鹏 (Liang Yi, Xie Yunxiang, Guan Yuanpeng). LCL 并网逆变器双闭环控制策略及其参数设计 (Novel dual loop control strategy and its parameters design method for LCL grid-connected inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (4): 30-38.
- [16] 赵光宙 (Zhao Guangzhou). 信号分析与处理 (Signal analysis and processing) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2006. 216-225.

Resonance mechanism and suppression of photovoltaic plants considering wide-band frequency characteristic of cable

YU Rong-jiang¹, MA Jiong¹, LI Jia-shuan¹, QUAN Yu²

(1. Hangzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The influence of high capacitance of transmission cable can not be neglected. The photovoltaic plants connected to transmission cable may be subject to resonances, which endangers the stable operation of photovoltaic (PV) plants. In consideration of this, a cable-connected PV power system in PV plants is taken as the research object, and the resonance mechanism of PV plants connected to transmission cable's revealed from aspect of a cable-connected PV power system's closed loop control. The research indicates that in consideration of transmission cable's capacitance, the closed-loop transfer function of a grid-connected PV power system has several peaks of magnitude, which indicates the output currents, the point of common coupling's currents and voltages will be harmonically distorted. And the impacts of cable length, parallel machines' number on resonance have been analysed. The virtual impedances at resonance frequency range are added to the inverter's grid side further, which reduces the peaks of magnitude of system closed-loop transfer function, and the purpose of resonance suppression and harmonic reducing is achieved. Simulation results validated the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: photovoltaic plants; harmonic resonance; transmission cable; resonance suppression