第 49 卷 第 2 期：713-731 高电压技术 Vol.49, No.2: 713-731
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211735

考虑直流子网影响的交直流混合微电网谐振特性分析

杨向真[1,2]，张徐进博[1,2]，杜　燕[1,2]，施　永[1,2]，陶　燕[1,2]，刘　灿[1,2]
（1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院，合肥 230009；2. 光伏系统教育部工程研究中心，合肥 230009）

摘　要：交直流混合微电网是未来配电网的重要组成形式。由于直流子网在混合微电网中所占比重提高，势必会对并网模式下的交直流混合微电网的谐振特性产生影响，而利用频域分析法需建立基于交直流混合微电网的高阶传递函数，建模困难。为了解决上述问题，提出了直流子网和互联变流器(interlinking converter，ILC)融合阻抗建模方法，建立了并网模式下交直流混合微电网系统的等效阻抗模型，利用模态分析法计算出系统谐振频率、参与因子以及参数灵敏度等谐振特性，进一步分析了 ILC 和直流子网参数变化对系统谐振特性的影响。分析表明，ILC 和直流子网部分参数变化会大幅改变系统的谐振频率及谐振峰值。结论不仅有利于谐波谐振的治理，同时也为系统参数的设计提供了依据。最后在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了交直流混合微电网仿真模型，验证所进行的谐振模态分析及参数变化对谐振特性影响的正确性。

关键词：交直流混合微电网；等效阻抗模型；谐振；模态分析法；互联变流器

Analysis of Resonance Characteristics of AC/DC Hybrid Microgrid Considering the Influence of DC Subgrid

YANG Xiangzhen[1,2], ZHANG Xujinbo[1,2], DU Yan[1,2] , SHI Yong[1,2], TAO Yan[1,2], LIU Can[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Research Center for Photovoltaic System Engineering of Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: The AC/DC hybrid microgrid is an important form of the future distribution gridwork. The increases of the proportion of DC subgrid in a hybrid microgrid will inevitably have an impact on the resonance characteristics of the AC/DC hybrid microgrid in grid-connected mode; however, the use of frequency domain analysis method requires the establishment of high-order transfer function based on AC/DC hybrid microgrid, whereas it is difficult to model. In order to solve the above problems, it is proposed to establish a fusion impedance modeling method of the DC subgrid and the interlinking converter (ILC), and to establish an equivalent impedance model of the AC/DC hybrid microgrid system in grid-connected mode, thus the system resonance characteristics such as frequency, participation factors and component sensitivity are calculated by the modal analysis method, and the influences of ILC and DC subgrid parameter changes on the system resonance characteristics are further analyzed. The analysis shows that ILC and some parameter changes of the DC subgrid will obviously change the resonance frequency and resonance peak value of the system. The analysis result not only is conducive to the treatment of harmonic resonance, but also provides a basis for the design of system parameters. Finally, an AC/DC hybrid microgrid simulation model was built on the Matlab/Simulink simulation platform to verify the correctness of the resonance modal analysis and the effect of parameter changes on the resonance characteristics.

Key words: AC/DC hybrid microgrid; equivalent impedance model; resonance; modal analysis method; interlinking converter

0　引言

近年来，光伏电源快速发展，缓解了化石能源消耗、环境污染、温室效应等方面的压力[1]，交直流混合微电网作为接纳光伏的有效手段，具有能量传输效率高、控制灵活、拓扑多变、可靠性强等优点，得到快速发展[2-5]。

典型的交直流混合微电网由交流子网、直流子网和互联变流器(interlinking converter, ILC)组成。并网运行时，可以将直流子网和 ILC 共同作为交流子网的一台并网变流器，由于各台并网变流器控制特性[6]、设备参数互不相同，ILC 与交流子网逆变器、交直流混合微电网与大电网之间都存在谐振的可能

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2601402)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2601402).

性[7]，继而导致谐波电压或电流在微电网中的放大与传播[8]。谐波谐振会影响系统的电能质量，严重时可导致系统失去稳定，给电网、用电设备造成危害。

目前，对于微电网谐振问题的研究主要集中在单个交流微电网和直流微电网。在交流微电网谐振问题上，文献[9-11]采用频域分析法，针对逆变器并网系统，通过伯德图、奈奎斯特曲线、根轨迹分析各单元输出阻抗，进而获取多逆变器与电网交互的谐振特性。文献[12-14]利用模态分析法对多逆变器并网的交流微电网的戴维南或诺顿等效模型进行源网交互谐振特性分析，但建模及分析时均将逆变器直流侧近似为理想电源，并未考虑直流侧对交流侧谐振特性的影响。

现在直流微电网谐振问题上，文献[15]利用模态分析法，对直流微电网的谐振特性进行了分析，并通过分析直流负载、控制器、线路阻抗等参数对于谐振特性的影响程度，提出了有源阻尼谐振抑制策略。文献[16]利用频域分析法，对直流微电网系统进行等效阻抗建模，提出了直流微电网高频振荡稳定性判据，揭示了直流微电网高频振荡稳定机理。文献[17]利用频域分析法，建立了聚合的恒功率负荷的动态模型，提出了阻抗倍增效应，通过分析揭示了聚合的恒功率负荷导致直流微电网谐振的机理。

在交直流混合微电网并网运行时，直流子网中负荷波动、光伏的功率波动、多光伏互联时系统特性变化等因素易引发直流母线电压振荡，进而对交直流混合微电网谐振产生影响。目前也有文献研究了直流波动对源网交流谐振影响的机理和抑制方法，文献[18]在弱电网下单台光伏并网系统的并网电流控制系统中引入基于直流功率前馈的电压控制回路，解决了由于温度、光照强度等外界因素变化引发的直流侧电压波动对于交流系统稳定性的影响。文献[19]利用阻抗分析法，分析了恒功率负载的负阻抗特性导致的 DC/DC 变流器与 DC/AC 变流器级联系统直流母线电压振荡，并提出了直流侧电压和交流侧功率的协同控制方法提高稳定性。上述文献只研究了单台变流器直流侧电压波动对源网交互谐振的影响，而交直流混合微电网中的 ILC 的直流侧是由多台光伏、线路网络以及负载共同组成的直流子网，其输出阻抗特性受光伏台数、多台光伏主电路及控制器参数影响，建模和分析更加复杂。因此需要重新建立交直流混合微电网系统等效阻抗模型，从而分析考虑直流子网影响的交直流混合微电网谐振峰值、谐振频率及影响谐振的主要参数等特性。

本文首先提出了含多台光伏、储能及恒功率负荷(constant power load，CPL)的直流子网和 ILC 融合建模方法，并建立了并网模式下交直流混合微电网等效阻抗模型；然后，利用模态分析法量化分析了考虑直流子网影响的交直流混合微电网系统的谐振频率、参与因子以及参数灵敏度等谐振特性，深入研究了直流子网及 ILC 各参数在较大范围内变化时对系统谐振特性的影响。获得了对谐振特性影响较大参数及在其影响下的谐振特性变化趋势，为谐波谐振的治理及系统参数设计提供了依据；最后，利用 Matlab/Simulink 仿真平台进行仿真实验，对上述分析结果进行验证。

1 交直流混合微电网系统建模

典型的交直流混合微电网主要由交流子网、直流子网和互联变流器构成，系统结构如图 1 所示。主要包括光伏、交流负载、直流负载、储能单元。其中，交流微电网通过公共连接点(point of common coupling，PCC)与大电网连接，既可以并网运行，也可以离网运行。连接交流子网与直流子网变换器称为互联变流器，用于实现子网间功率双向流动。本文主要研究并网模式下的交直流混合微电网，该模式下交流母线电压由大电网支撑，直流母线电压由 ILC 支撑。为了研究考虑直流子网影响的交直流混合微电网谐波谐振，并通过模态分析法分析其谐振特性。本章将采用直流子网和 ILC 的融合阻抗建模方法，建立并网模式下的交直流混合微电网系统等效阻抗模型为采用模态分析法分析系统谐振特性提供基础。

1.1 交流子网建模

交流子网由光伏、储能单元和交流负载组成，混合微电网并网运行时，储能单元采用恒定输出电

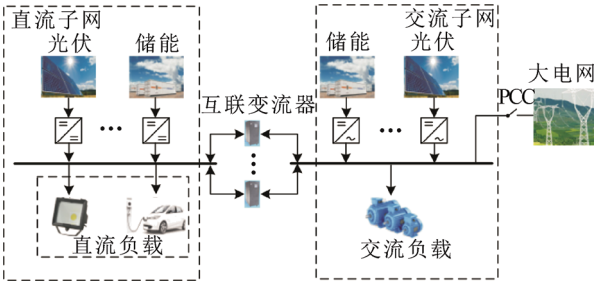


图 1 交直流混合微电网系统结构

Fig.1 Architecture of AC/DC hybrid microgrid system

流对蓄电池充放电[20]，其建模与光伏并网逆变器建模类似，故本节以附录 A 图 A1 所示的结构图为例进行分析。

根据附录 A 图 A2 控制框图，利用梅森增益公式可以求出附录 A 图 A1 中 AB 点左侧的戴维南等效阻抗并推广至第 i 台(i=1, 2, …, n)，得 $Z_{eqi}(s)$为

$$Z_{eqi}(s)=-\frac{U_C(s)}{I_{L2}(s)}=\frac{Z_C(Z_{L1}+G_iG_{di}G_{inv})}{Z_{L1}+Z_C+G_iG_{di}G_{inv}} \tag{1}$$

式中：Z_{L1}、Z_C 分别为逆变器侧感抗、滤波器容抗；$G_i(s)$为电流控制器传递函数，$G_i(s)$=K_{IP}+K_{II}/s；$G_{di}(s)$为并网逆变器数字控制延时环节传递函数，选择 1.5 倍开关周期，$G_{di}(s)$=1/(1.5$T_s s$+1)；$G_{inv}(s)$为逆变桥线性增益环节，本文设置为 1；U_C 为滤波器电容电压；I_{L2} 为逆变器网侧输出电流。

根据上述分析，同时考虑各单元到并网点的线路阻抗，可以得出图 2 所示的 n 台变流器组成的交流子网等效模型。

图 2 中：Z_{Line1}，Z_{Line2}，…，Z_{Linen} 表示并网逆变器出口到并网点的线路阻抗；Z_{LineL} 表示交流负荷到并网点的线路阻抗；Z_{L21}、Z_{L22}、…、Z_{L2n} 为逆变器网侧电感阻抗；Z_{Load} 为交流负荷阻抗；Z_g、U_g 为电网阻抗和电网电压；i_{L21}、i_{L22}、…、i_{L2n} 为逆变器网侧电感电流。

1.2　直流子网和 ILC 融合建模

1.2.1　直流子网等效电路

直流子网是由多台光伏、储能和直流负载组成。光伏电池出口接 Boost 变流器，输出接直流子网母线。Boost 变换器采用最大功率追踪(maximum power point tracking，MPPT)控制，实现光伏系统的最大功率输出。由于并网模式下直流母线电压由 ILC 支撑，储能单元采用恒功率充放电控制[21]，其与 CPL 具有相似的外特性，建模时可以视为放电状态下输出功率为正，充电状态下输出功率为负的 CPL。而直流侧负荷多为采用闭环控制的变换器，故本文将储能单元(本文以储能单元充电为例)与直流负载统一视为 CPL，并建立其阻抗模型[22]，其中 Z_{CPLx}= −U^2_{Lx}/P_{refx}；i_{CPLx}=2P_{refx}/U_{Lx}(x=1, 2, …, h)，U_{Lx} 为第 x 个 CPL 稳定运行电压，P_{refx} 为第 x 个 CPL 的参考功率。直流子网结构如图 3 所示，其中，L_b 和 C_{in} 分别为 Boost 变流器的输入电感和输入电容；U_o 和 C_o 分别为 Boost 输出电压和输出电容；U_{dc} 和 C_{dc} 分别为直流母线电压和直流母线电容；i_{PV} 为光伏模块输出电压；U_{PV} 为光伏模块输出电压；U_{ref} 为 MPPT 算法计算出的最大功率点参考电压；Z_{LineDC} 为 Boost 变流器输出到直流母线的线路阻抗。

如图 4 为 Boost 变流器的控制框图，$G_c(s)$为电压补偿环节，本文采用 PI 调节器，$G_c(s)$=K_{cP}+K_{cI}/s；$G_{PWM}(s)$为 PWM 环节传递函数，$G_{PWM}(s)$=1/V_m，V_m 表示三角载波幅值，本文取 1；$G_{PV}(s)$表示占空比 $d(s)$到光伏列阵输出电压 $U_{PV}(s)$的传递函数；$G_{dUref}(s)$表示占空比 $d(s)$到光伏列阵参考输出电压 $U_{ref}(s)$的传递函数，其表达式如式(2)所示。其中，D 为稳态占空比。

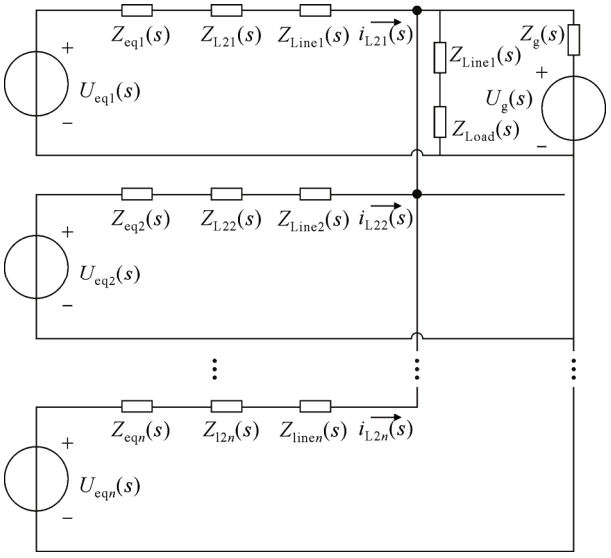


图 2　交流子网等效电路

Fig.2　Equivalent circuit of AC subgird

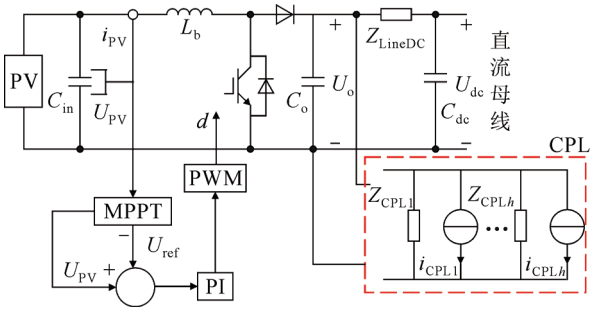


图 3　含 CPL 的单台光伏系统等值结构

Fig.3　Equivalent structure of a single photovoltaic system with CPL

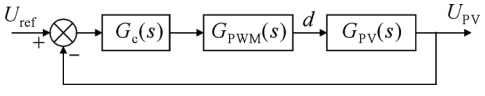


图 4　Boost 控制框图

Fig.4　Boost control block diagram

$$\begin{cases} G_{\mathrm{dU_{ref}}}(s)=\dfrac{d(s)}{U_{\mathrm{ref}}(s)}=\dfrac{G_{\mathrm{c}}(s)G_{\mathrm{PWM}}(s)}{1+G_{\mathrm{c}}(s)G_{\mathrm{PWM}}(s)G_{\mathrm{PV}}(s)} \\ G_{\mathrm{PV}}(s)=\dfrac{U_{\mathrm{o}}}{s^2L_{\mathrm{b}}C_{\mathrm{in}}+\dfrac{L_{\mathrm{b}}s}{Z_{\mathrm{CPL}}(1-D)^2}+1} \end{cases} \tag{2}$$

为了建立直流子网的等值模型，本文利用状态空间法建立的第 j(j=1, 2, …, m)台含 CPL 的单台光伏系统平均模型[23]，如图 5 所示。Z_{CPL} 为 CPL 戴维南等效阻抗，$Z_{\mathrm{CPL}}=Z_{\mathrm{CPL}1}//\cdots//Z_{\mathrm{CPL}h}$；$U_{\mathrm{CPL}}$ 为戴维南等效电压源，$U_{\mathrm{CPL}}=(i_{\mathrm{CPL}1}+\cdots+i_{\mathrm{CPL}h})Z_{\mathrm{CPL}}$；$U_{\mathrm{in}}$ 为 Boost 输入电压；R_{PV} 为光伏模块等效内阻；i_{b} 为 Boost 输入侧电感电流。其状态方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\mathrm{b}j} \\ \dot{U}_{\mathrm{o}j} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -\dfrac{R_{\mathrm{PV}j}}{L_{\mathrm{b}j}} & -\dfrac{1-d_j(t)}{L_{\mathrm{b}j}} \\ \dfrac{1-d_j(t)}{C_{\mathrm{o}}} & -\dfrac{1}{Z_{\mathrm{CPL}}C_{\mathrm{o}}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{\mathrm{b}j} \\ U_{\mathrm{o}j} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_{\mathrm{b}j}} \\ 0 \end{bmatrix}U_{\mathrm{PV}j} \tag{3}$$

令图 5 所示第 j 台含 CPL 的单台光伏系统平均模型变压器变比：$N_j(t)$=1−$d_j(t)$，结合式(2)，可以得出拉氏域下的变比 $N_j(s)$

$$\begin{aligned} N_j(s)&=\frac{1}{s}-d_j(s) \\ &=\frac{1+G_{\mathrm{c}}(s)G_{\mathrm{PWM}}(s)G_{\mathrm{PV}}(s)-sU_{\mathrm{refj}}G_{\mathrm{c}}(s)G_{\mathrm{PWM}}(s)}{s(1+G_{\mathrm{c}}(s)G_{\mathrm{PWM}}(s)G_{\mathrm{PV}}(s))} \end{aligned} \tag{4}$$

若不计光伏电池内阻 $R_{\mathrm{PV}j}$，将第 j 台含 CPL 的单台光伏系统平均模型输入侧电路折算到变流器输出侧，并考虑变流器出口到直流母线线路阻抗，推广到多台并联，可以得到如图 6 所示的直流子网等效电路。式中：$L_{\mathrm{b}1}$，$L_{\mathrm{b}2}$，…，$L_{\mathrm{b}m}$ 分别为 1~m 台光伏中 Boost 变流器的输入电感。

为了获取直流子网与 ILC 融合模型的等效阻抗，将直流子网等值为戴维南等效电路，其表达式为

$$U_{\mathrm{dc}}(s)=I_{\mathrm{dc}}(s)Z_{\mathrm{eq_dc}}(s)+U_{\mathrm{eq_dc}}(s) \tag{5}$$

式中：$Z_{\mathrm{eq_dc}}(s)$为直流子网戴维南等值阻抗；$U_{\mathrm{eq_dc}}(s)$为直流子网戴维南等值电压源。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{eq_dc}}(s)=\dfrac{U_{\mathrm{PV1}}/N_1(Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b2}}/N_2^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}}))}{sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2+Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b2}}/N_2^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}})}+ \\ \quad\dfrac{U_{\mathrm{PV2}}/N_2(Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}}))}{sL_{\mathrm{b2}}/N_2^2+Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}})}+\ldots+ \\ \quad\dfrac{U_{\mathrm{PV}m}/N_m(Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{b(m-1)}}/N_{m-1}^2)//(1/sC_{\mathrm{o}}))}{sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2+Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{b(m-1)}}/N_{m-1}^2)//(1/sC_{\mathrm{o}})}- \\ \quad\dfrac{U_{\mathrm{CPL}}((sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}}))}{Z_{\mathrm{CPL}}+(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}})} \\ Z_{\mathrm{eq_dc}}(s)=Z_{\mathrm{CPL}}//(sL_{\mathrm{b1}}/N_1^2)//\ldots//(sL_{\mathrm{bm}}/N_m^2)//(1/sC_{\mathrm{o}})+Z_{\mathrm{LineDC}} \end{cases} \tag{6}$$

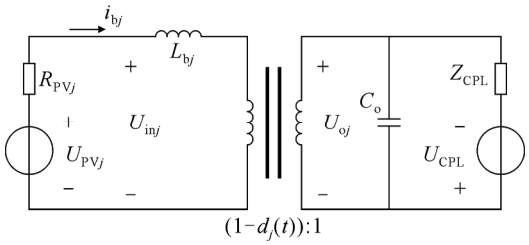


图 5 含 CPL 的单台光伏系统平均模型

Fig.5 Average model of a single photovoltaic system with CPL

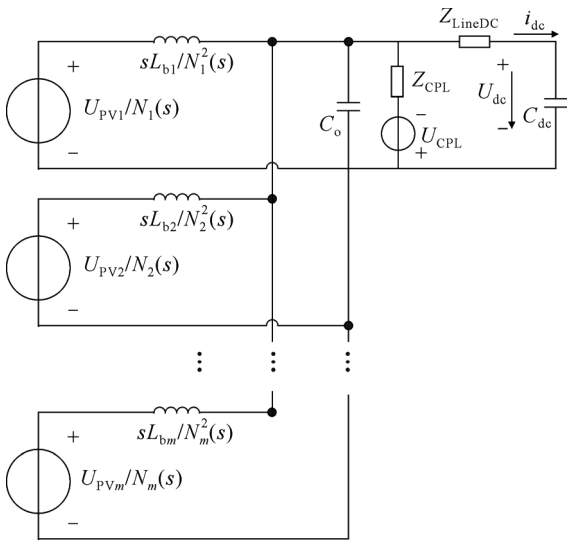


图 6 直流子网等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of DC subgird

1.2.2 直流子网和 ILC 融合等效阻抗建模

典型的 ILC 结构如图 7 所示。Z_{L1ILC} 为 ILC 逆变器侧电感；Z_{L2ILC} 为网侧电感；Z_{CILC} 为滤波电容；i_{L1ILC} 为 ILC 逆变器侧电流；$i_{\mathrm{L1}d\mathrm{ILC}}$ 为 ILC 逆变器侧 d 轴电流，$i_{\mathrm{L1}q\mathrm{ILC}}$ 为 ILC 逆变器侧 q 轴电流；$i_{\mathrm{L1}d\mathrm{ILCref}}$ 为 ILC 逆变器侧 d 轴参考电流，$i_{\mathrm{L1}q\mathrm{ILCref}}$ 为 ILC 逆变器侧 q 轴参考电流；$U_{\mathrm{dc_ref}}$ 为直流母线电压参考值；d_{ILC} 为 PWM 波占空比。由于本文研究的是并网模式下的交直流混合微电网，电网通过 ILC 来维持直流母线电压稳定，因而，ILC 采用直流母线电压外环和电流内环相结合的控制策略[24]。

文献[25]对光伏并网逆变器电流控制环路 dq 耦合关系进行分析，得出如下结论：整个频域范围内，d 轴直接放大传递函数始终比 q 轴耦合传递函数大 3 倍以上，因此工程上处理 d 轴问题时，通常忽略 q 轴耦合的影响。本文为了分析 ILC 直流侧对交流侧的影响，以 d 轴控制框图为例进行分析，并对下标予以忽略。如图 8 所示。

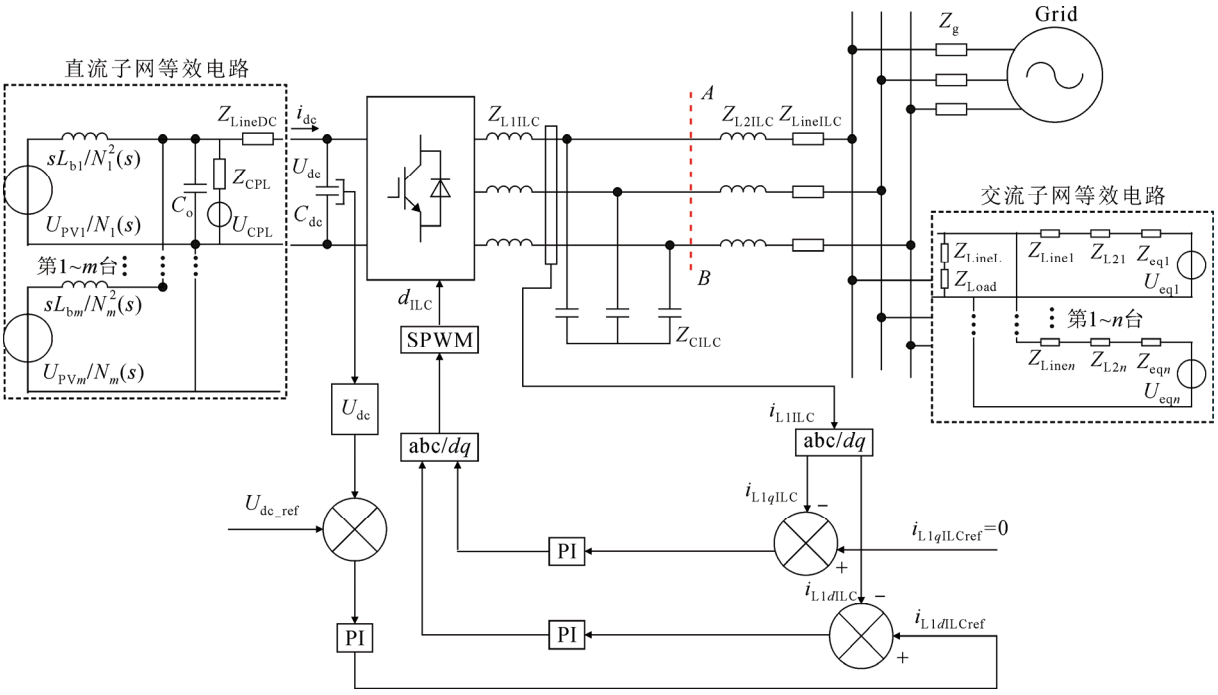


图 7　互联变流器结构图

Fig.7　Structure diagram of ILC

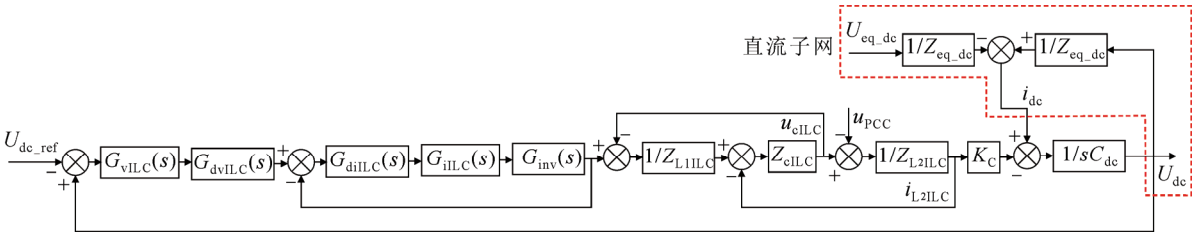


图 8　ILC 直流母线电压控制框图

Fig.8　ILC constant voltage control block diagram

图 8 中：$G_{iILC}(s)$，$G_{vILC}(s)$分别为 ILC 电流内环和电压外环的比例积分控制器；$G_{dvILC}(s)$、$G_{diILC}(s)$为电压、电流数字控制延时环节传递函数，选择 0.5、1.5 倍开关周期的延迟；K_C 为根据瞬时功率守恒得到的网侧电流到输入 ILC 的电流稳态比例系数，表达式为：$K_C=3U_{PCC}/2U_{dc}$。虚线框内为 1.2 节中 $U_{dc}(s)$，$I_{dc}(s)$的关系式，即式(5)，表征直流子网等效阻抗，为了研究考虑直流子网影响的交直流混合微电网谐波谐振及其特性，将直流子网等效模型和 ILC 融合进行等效输出阻抗的计算，从而将直流子网与 ILC 联系起来，与 1.1 节求取 AB 点左侧戴维南等效电路方法相同，利用梅森增益公式，求得直流子网和 ILC 融合模型等效输出阻抗 $Z_{eqILC}(s)$，如式(7)所示。

$$Z_{eqILC}(s)=\frac{Z_{cILC}\left(sZ_{L1ILC}Z_{eq_dc}C_{dc}+sZ_{eq_dc}C_{dc}G_{diILC}G_iG_{inv}-Z_{L1ILC}-G_{di}G_iG_{inv}+Z_{eq_dc}K_CG_{dvILC}G_{vILC}G_{diILC}G_{iILC}G_{inv}\right)}{sZ_{L1ILC}Z_{eq_dc}C_{dc}+sZ_{eq_dc}C_{dc}Z_{cILC}+sZ_{eq_dc}C_{dc}G_{diILC}G_{iILC}G_{inv}-Z_{L1ILC}-Z_{cILC}-G_{diILC}G_{iILC}G_{inv}} \tag{7}$$

1.3　交直流混合微电网整体建模

根据 1.1 节交流子网的等效电路和 1.2 节直流子网与 ILC 融合模型的等效电路，可以得出交直流混合微电网系统的等效电路，如图 9 所示。其中，节点 1~k(k=n)代表交流子网中 n 台并网逆变器输出端节点；节点 k+1 代表 ILC 交流侧输出端节点；节点 k+2 代表交流负载接入节点；节点 k+3 代表并网节点 PCC。本文后续将选取 n=2(k=2)，m=2，h=2(即交流子网中两台光伏，直流子网中两台光伏和两台 CPL)的 5 节点系统进行谐振特性模态分析。

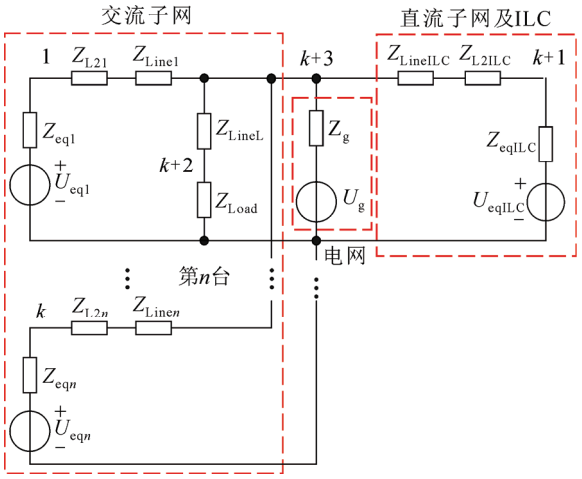


图 9 交直流混合微电网等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of AC/DC hybrid microgrid

求解图 9 所示系统在 k=2 时的节点导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_1$，如式(8)所示。其中，Z_{LINEi}=Z_{Linei}+Z_{L2i}(i=1,2)；$Z_{LINEILC}$=$Z_{LineILC}$+Z_{L2ILC}。

$$\boldsymbol{Y}_1=\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{eq1}}+\frac{1}{Z_{LINE1}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_{LINE1}} \\ 0 & \frac{1}{Z_{eq2}}+\frac{1}{Z_{LINE2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_{LINE2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_{eqILC}}+\frac{1}{Z_{LINEILC}} & 0 & -\frac{1}{Z_{LINEILC}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{Load}}+\frac{1}{Z_{LineL}} & -\frac{1}{Z_{LineL}} \\ -\frac{1}{Z_{LINE1}} & -\frac{1}{Z_{LINE2}} & -\frac{1}{Z_{LINEILC}} & -\frac{1}{Z_{LineL}} & \frac{1}{Z_g}+\frac{1}{Z_{eqILC}}+\sum_{i=1}^{2}\frac{1}{Z_{eqi}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

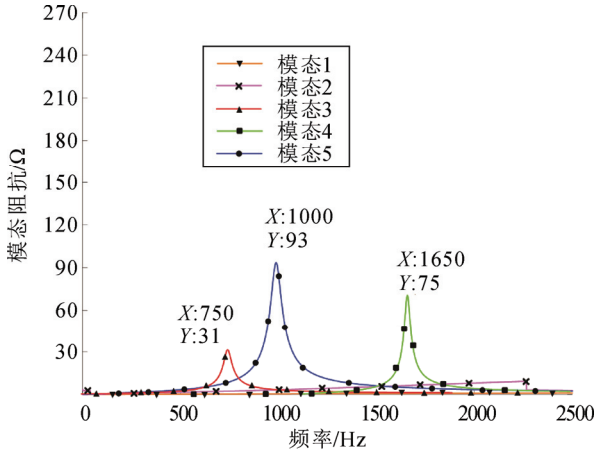
本节通过直流子网和 ILC 的融合阻抗建模方法，建立了并网模式下的交直流混合微电网系统等效阻抗模型，求解系统节点导纳矩阵，为系统谐振模态分析的提供理论基础。

2 交直流混合微电网谐振模态分析

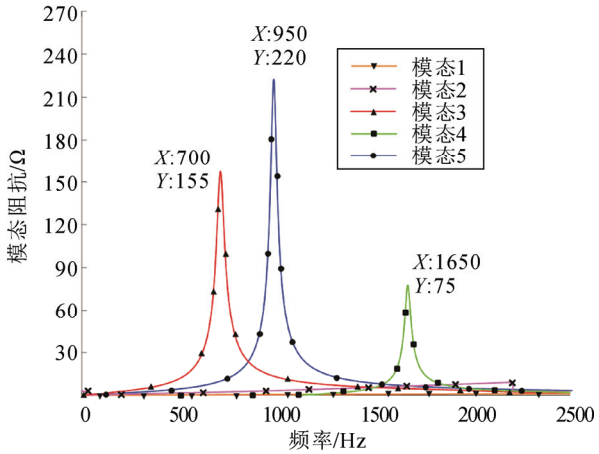
由于模态分析法具有分析过程简便，可以获得参与因子、元件灵敏度等更多谐振相关信息等优势[12]。本章将在第一章建立的交直流混合微电网等效模型的基础上，进一步进行系统的谐振分析。采用模态分析的方法，分析系统的谐振特性，获取有效的谐振信息。

2.1 谐振频率及峰值分析

以表 A1 所示系统各单元参数，利用 Matlab 进行模态阻抗计算，可以得出图 10 所示的 5 节点频率—模态阻抗曲线。其中，图 10(a)为不考虑直流子网影响的情况下的频率—模态阻抗曲线，此时 ILC 直流侧与并网逆变器一致，为直流电源；图 10(b)为考虑直流子网影响的情况下的频率—模态阻抗曲线。



(a) 不考虑直流子网影响时频率-模态阻抗曲线



(b) 考虑直流子网影响时频率-模态阻抗曲线

图 10 5 节点系统模态分析结果

Fig.10 Modal analysis results of 5-bus system

图 10 频率—模态阻抗曲线表明：(1)无论考虑直流子影响与否，该 5 节点交直流混合微电网系统均存在低、中、高频的 3 个谐振峰，根据文献[13]，谐振峰的个数与逆变器台数以及逆变器参数有关。(2)根据图 10(a)，不考虑直流子网影响时，在模态 3 存在 750 Hz，模态 4 存在 1650 Hz 谐振峰，在模态 5 存在 1000 Hz 谐振峰，其中，1000 Hz 谐振频率峰值最大。(3)根据图 10(b)，考虑直流子网影响时，低、中频谐振峰值大幅增大，其谐振频率左移；高频谐振峰值和频率基本不变。存在 700 Hz、950 Hz、1650 Hz 谐振峰，其中，950 Hz 谐振频率峰值最大。谐振峰的存在，表明谐波电压或电流极可能在该频率处被放大和传播，一方面导致电网的电能质量下降，另一方面可诱发谐波不稳定性，导致系统不稳定，威胁系统安全稳定运行。

2.2 谐振参与因子分析

为描述考虑直流子网影响的情况下，各节点对

谐振的可激励性、可观测性或参与度，寻找各次谐振的中心，需求解系统各节点参与因子值，见表 1。

根据表 1：(1)系统中谐振的关键模态由系统全体或部分节点共同作用产生；(2)在 700 Hz 谐振频率下，节点 2 的参与因子很小；节点 1，3，4，5 的参与因子较高，其中节点 3 参与因子最大；在 950 Hz 谐振频率下，节点 2，4，5 的参与因子很小；节点 1，3 参与因子较高，其中节点 1 的参与因子最大；在 1650 Hz 谐振频率下，节点 1，3 的参与因子很小，节点 2，4，5 的参与因子较高，其中节点 2 参与因子最大。参与因子越高的节点其可激励性与可观测性更强，参与因子最高的节点为该次谐振的谐振中心，谐振影响范围最广。

2.3　归一化模态灵敏度分析

为了量化分析各参数对谐振峰值的影响，本文采用归一化模态灵敏度分析方法[26]，来揭示具体参数对谐振峰值的影响程度，归一化模态灵敏度为

$$\left.\frac{\partial|\lambda_y|}{\partial\alpha}\right|_{\text{norm}}=\frac{\partial|\lambda_y|/|\lambda_y|}{\partial\alpha/\alpha}=\frac{\partial|\lambda_y|}{\partial\alpha}\cdot\frac{\alpha}{|\lambda_y|} \tag{9}$$

式中：α 为具体元件；λ_y 为模态关键特征值(y=1, 2, …, 5)。

图 10 中系统在模态 5、4 和 3 分别存在 700 Hz、950 Hz 和 1650 Hz 3 个谐振峰，此时模态关键特征值分别为 λ_5，λ_4，λ_3。图 11(a)，(b)，(c)为各谐振频率下相应模态关键特征值对各参数的归一化灵敏度值。归一化值为正表明在该参数的稳态给定值基础上小范围增大其值可以使特征值增大，减小模态阻抗；为负则相反。且归一化值的绝对值越大表面该参数对于模态阻抗的影响越大，即对谐振峰值的影响越大。

根据图 11 可得出如下结论：(1)ILC 及直流子网参数对于高频谐振峰基本没有影响。(2)ILC 及直流子网中，对低频谐振峰影响较大的有：L_2、K_{IP}、L_b、C_{dc}、P_{ref}、m、R_{line}、K_{cP}；对中频谐振峰影响较大的有：C、L_1、L_2、K_{IP}、L_b、C_{dc}、K_{cP}。其中，L_1、L_2、C 为 ILC 逆变器侧电感、网侧电感、滤波电容值；R_{line} 为 Boost 输出到直流母线线路电阻；K_{IP} 为 ILC 电流 PI 控制器 P 参数；K_{cP} 为 Boost 变流器电流 PI 控制器 P 参数。

本节对交直流混合微电网系统的谐振特性进行了分析，获取了谐振频率、谐振峰值、各节点参与因子以及元件模态灵敏度等谐振信息，为维护系统的稳定性提供了重要的参考依据。

表 1　系统各谐振频率下参与因子值

Table 1　The value of participation factor at each resonance frequency of the system

谐振频率/Hz	参与因子值				
	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
700	0.195	0.048	0.572	0.109	0.110
950	0.828	0.012	0.144	0.021	0.021
1650	0.014	0.849	0.006	0.066	0.067

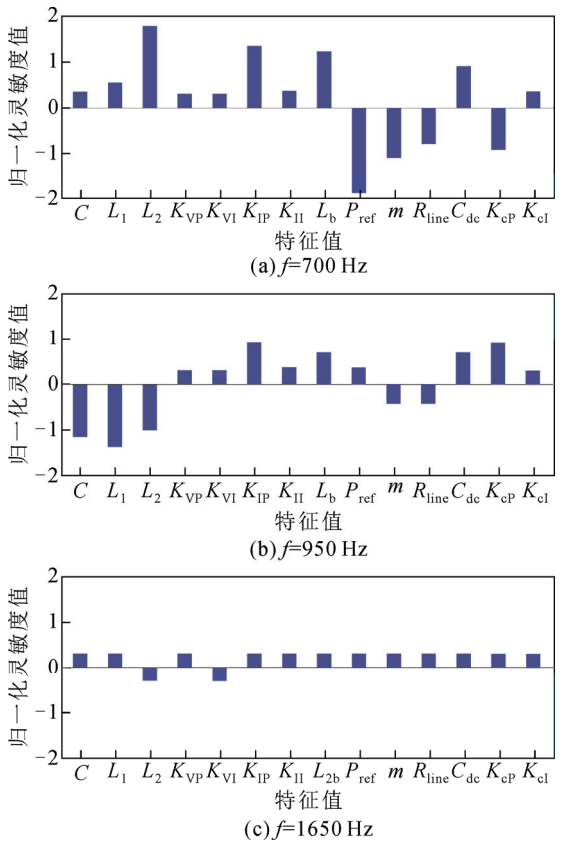


图 11　ILC 及直流子网元件参数对关键特征值的归一化灵敏度

Fig.11　Normalized sensitivity of ILC and DC subgrid component parameters to key eigenvalues

3　参数变化对系统谐振特性的影响

由于归一化灵敏度只能分析元件参数在稳态给定值小范围内对谐振的影响趋势，且无法分析其对谐振频率的影响。本节将采用模态分析法分析较大范围的参数变化对系统谐振特性的影响。文献[13-14]对交流微电网中弱电网环境下电网阻抗变化，并网逆变器参数以及其数量、组合等变化对系统谐振的影响做出了详尽研究，但尚未对 ILC 及直流子网参数对于谐振特性的影响进行的研究。故本节将重点对 ILC，直流子网参数变化对于谐振特性的影响进行研究。

3.1 ILC 参数变化的影响

ILC 参数变化对于谐振特性的影响与 LCL 型并网逆变器类似，见附录 A 中图 A3，A4。其中 ILC 交流侧电感 L_2 增大会导致中频谐振峰值大幅减小；电流控制器比例系数 K_{IP} 增大会导致低频谐振峰值大幅增大；滤波电容 C 增大会导致中频谐振峰值大幅减小同时低、中频谐振频率大幅减小。

3.2 直流子网参数变化的影响

3.2.1 Boost 变流器输入电感 L_b 的影响

图 12 为 Boost 变流器电感 L_b 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 L_b 增加，系统低频谐振峰值增大且变化幅度大，谐振频率增大但变化幅度小；中频谐振峰值先增大后不变，谐振频率不变；高频谐振峰基本不变。

3.2.2 CPL 参考功率变化的影响

图 13 为 CPL 参考功率 P_{ref} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 CPL 参考功率增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率不变；中、高频谐振峰基本不变。

3.2.3 光伏个数 m 的影响

图 14 为参数相同的光伏个数 m 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 m 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率增大但变化幅度小；中频谐振峰值减小但变化幅度小，谐振频率不变；高频谐振峰基本不变。

3.2.4 直流子网线路电阻 R_{line} 的影响

图 15 为直流子网线路电阻 R_{line} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 R_{line} 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率减小但变化幅度小；中频谐振峰基本不变；高频谐振峰基本不变。

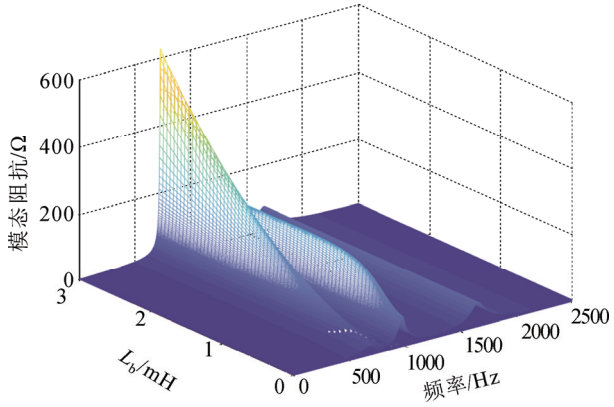


图 12 Boost 变流器电感 L_b 对谐振特性的影响

Fig.12 Influence of Boost converter inductance L_b on resonance characteristics

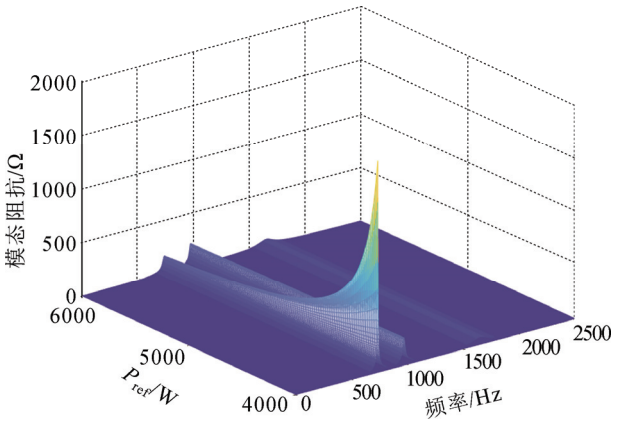


图 13 CPL 参考功率对谐振特性的影响

Fig.13 Influence of CPL reference power on resonance characteristics

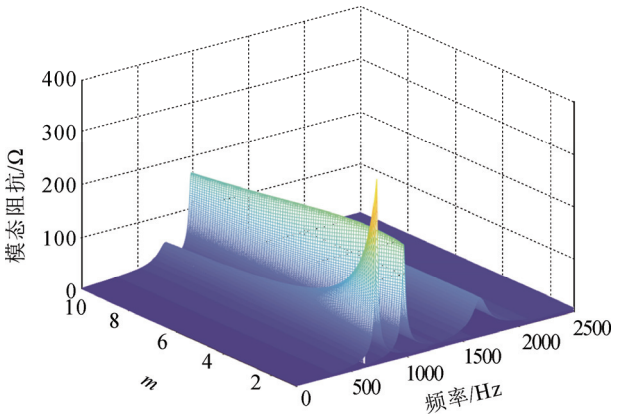


图 14 分布式电源个数 m 对谐振特性的影响

Fig.14 Influence of Number of distributed generation m on resonance characteristics

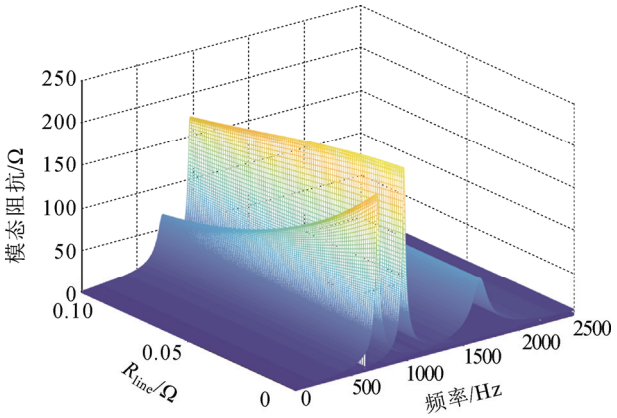


图 15 直流子网线路电阻 R_{line} 对谐振特性的影响

Fig.15 Influence of DC subgrid line resistance R_{line} on resonance characteristics

3.2.5　母线电容 C_{dc} 的影响

图 16 为母线电容 C_{dc} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 C_{dc} 增加，系统低频谐振峰值增大且变化幅度大，谐振频率减小但变化幅度小；中频谐振峰值先增大后不变，谐振频率减小但变化幅度小；高频谐振峰基本不变。

3.2.6　Boost 变流器控制参数的影响

图 17(a)、(b)为 Boost 变流器控制参数 K_{cP}，K_{cI} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：(1)随着 K_{cP} 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率增大且变化幅度大；中频谐振峰值先增加后减小且变化幅度大，谐振频率增大；高频谐振峰基本不变。(2)随着 K_{cI} 增加，系统低频谐振峰值增大但变化幅度小，谐振频率基本不变；中高频谐振峰及谐振频率基本不变。

本节对参数变化对交直流混合微电网系统谐振特性的影响进行了详尽的分析，可以得出如下结论：(1)ILC 中：ILC 交流侧电感 L_2 增大会导致中频谐振峰值大幅减小；电流控制器比例系数 K_{IP} 增大会导致低频谐振峰值大幅增大；滤波电容 C 增大会导致中频谐振峰值大幅减小同时低、中频谐振频率大幅减小。(2)直流子网中：Boost 变流器电感 L_b、直流母线电容 C_{dc} 增大会导致低、中频谐振峰值增大，C_{dc} 的增大同时会导致低、中频谐振频率减小。CPL 参考功率 P_{ref}、光伏个数 m、线路电阻 R_{line}、控制器比例系数 K_{cP} 增大会导致低频谐振峰值减小，同时 K_{cP} 增大会导致低中频谐振频率增大以及中频谐振峰值先增大后减小。

4　仿真分析

本章将利用 Matlab/Simulink 搭建如图 9 所示的 5 节点交直流混合微电网系统仿真模型对上述理论分析进行验证，各单元参数同表 A1。

4.1　系统谐振特性仿真

以交流子网直流子网均并联两台分布式电源的交直流混合微电网系统为例验证第二章模态分析的结果。图 18 为节点 1—5 分别依次同时注入 14、19、33 次单位谐波电流时各节点的电压频谱图。本文以图 19 所示节点 3 注入 14 次单位谐波电流时节点 3 和节点 2 的电压时域波形图为例，观察谐波电压的放大情况。

根据图 18 可以得出结论：(1)在交直流混合微电网系统各节点注入 14，19，33 次的单位谐波电流时，节点 3，1，2 对应产生了较大的该次谐波电压，其中 19 次谐波电压幅值最大，与图 10(b)所示的系统谐振频率及峰值结论一致。(2)在节点 1、3 注入

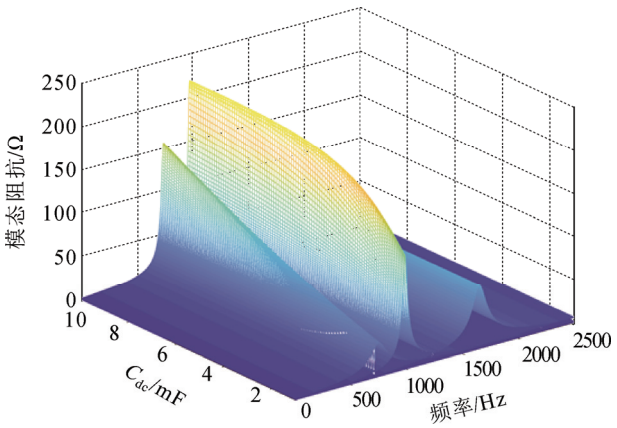
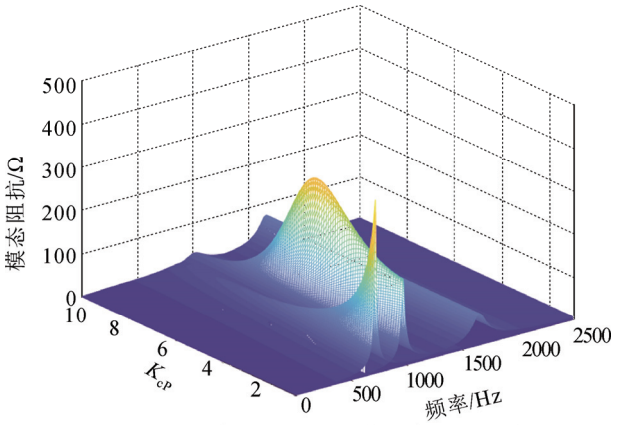
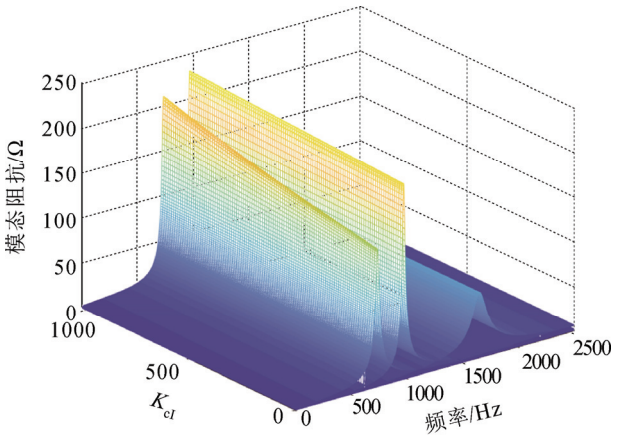


图 16　母线电容 C_{dc} 对谐振特性的影响

Fig.16　Influence of bus capacitors C_{dc} on resonance characteristics



(a) Boost控制器比例系数K_{cP}变化的影响



(b) Boost控制器积分系数K_{cI}变化的影响

图 17　Boost 变流器控制参数对谐振特性的影响

Fig.17　Influence of Boost converter control parameters on resonance characteristics

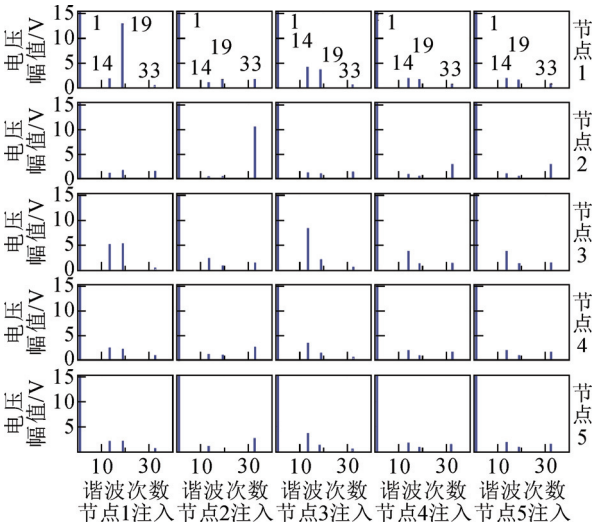


图 18 节点 1—5 注入单位谐波电流时节点电压频谱图

Fig.18 Frequency spectrum of node voltage with unit harmonic current injected into node 1—5

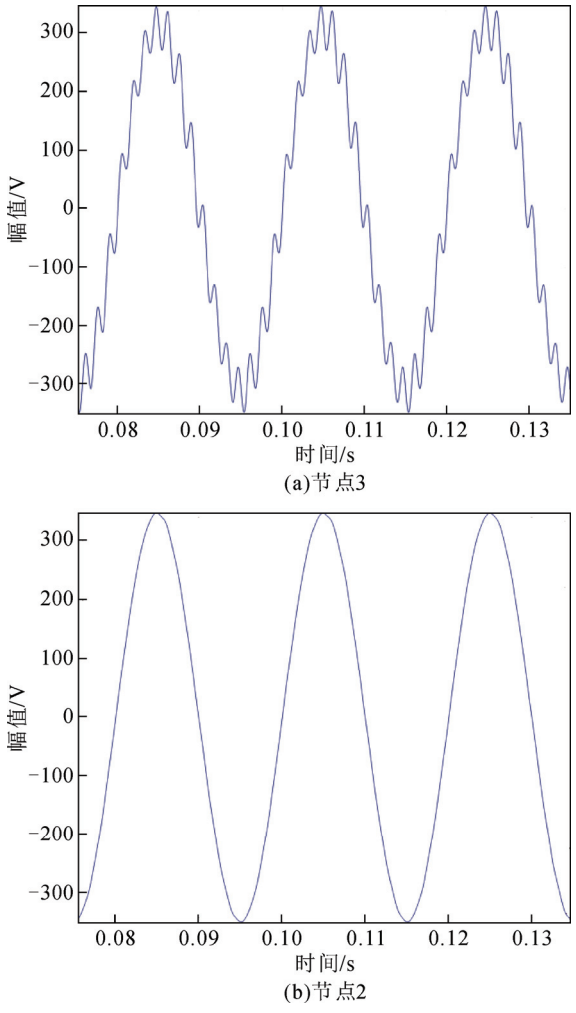


图 19 节点 3、2 注入 14 次单位谐波电流的电压波形图

Fig.19 The voltage waveform diagram of the 14th unit harmonic current injected at nodes 3 and 2

14、19 次的单位谐波电流时，该节点在该次的谐波电压幅值比在其他节点注入时的大；在节点 2 注入 33 次的单位谐波电流时，该节点在该次的谐波电压幅值比在其他节点注入时的大，且节点 3 不具备该次谐振模态的可激励性与可观测性。与表 2 所示的参与因子计算结果相符。

4.2 参数变化对谐振特性的影响仿真

根据表 1 计算的参与因子，由于节点 1 对于各模态谐振均有一定的可激励性与可观测性，所以通过向该节点注入 12，14，17，19，33 次 3%的谐波电流来观测参数变化下该节点各次谐振峰的变化情况。

对于 ILC 参数变化对于谐振特性影响的仿真见附录 A 中图 A5，A6，仿真表明 ILC 参数变化对于谐振特性的影响结论同 3.1 节。

图 20 为 Boost 变流器电感 L_b 变化时节点电压频谱图，该仿真结果表明：随着 L_b 增加，系统低频谐振峰值增大且变化幅度大，谐振频率增大但变化幅度小；中频谐振峰值先增大后不变，谐振频率不变；高频谐振峰基本不变。与 3.2.1 节结论一致。

图 21 为 CPL 参考功率 P_{ref} 变化时节点电压频谱图，该仿真表明：随着 P_{ref} 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率不变；中、高频谐振峰基本不变。与 3.2.2 节结论一致。

图 22 为参数相同的光伏个数 m 变化时节点电压频谱图，该仿真结果表明：随着 m 增加，系统低频谐振峰值减小，谐振频率增大但变化幅度小；中频谐振峰值减小但变化幅度小，谐振频率不变；高频谐振峰基本不变。与 3.2.3 节结论一致。

图 23 为直流子网线路电阻 R_{line} 变化时节点电压频谱图，该仿真结果表明：随着 R_{line} 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率不变；中频谐振峰减小但变化幅度小；高频谐振峰基本不变。与 3.2.4 节结论一致。

图 24 为直流母线电容 C_{dc} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：随着 C_{dc} 增加，系统低频谐振峰值增大，谐振频率减小但变化幅度小；中频谐振峰值先增大后不变，谐振频率减小但变化幅度小；高频谐振峰基本不变。与 3.2.5 节结论一致。

图 25(a)、(b)为 Boost 变流器控制参数 K_{cP}，K_{cI} 变化时，系统谐振频率的变化情况。可以得出结论：(1)随着 K_{cP} 增加，系统低频谐振峰值减小且变化幅度大，谐振频率增大且变化幅度大；中频谐振峰值

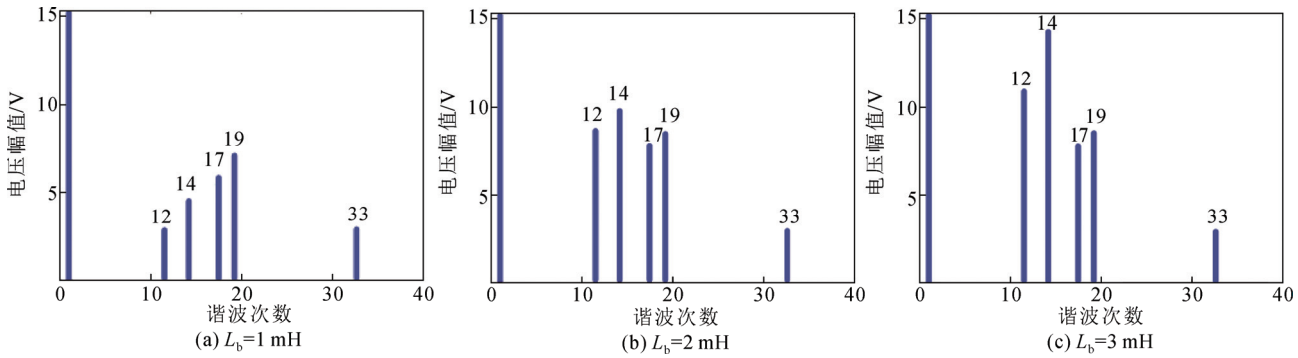


图 20　L_b 变化时节点电压频谱图

Fig.20　Frequency spectrum of node voltage when L_b changes

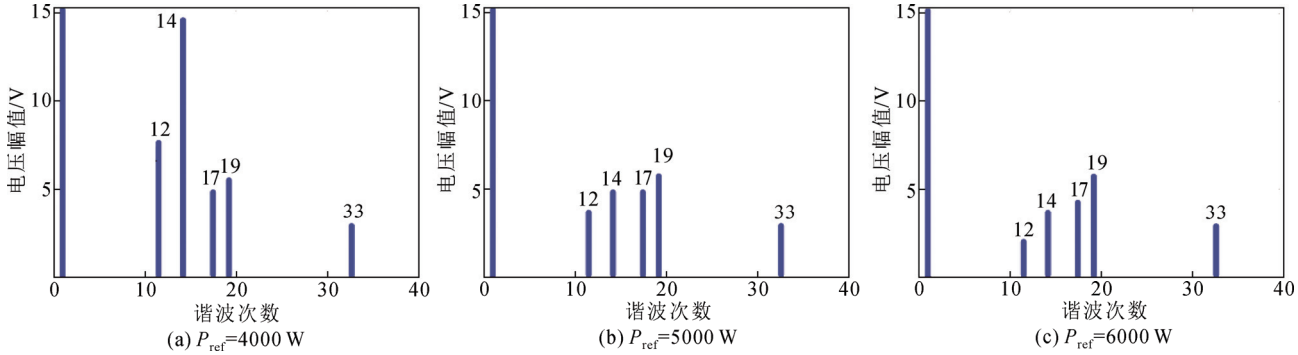


图 21　CPL 参考功率变化时节点电压频谱图

Fig.21　Frequency spectrum of node voltage when CPL reference power changes

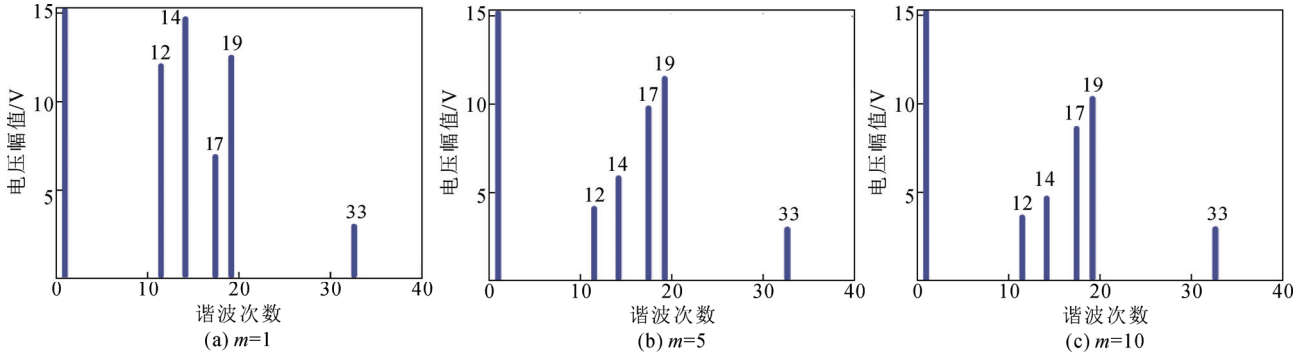


图 22　m 变化时节点电压频谱图

Fig.22　Frequency spectrum of node voltage when m changes

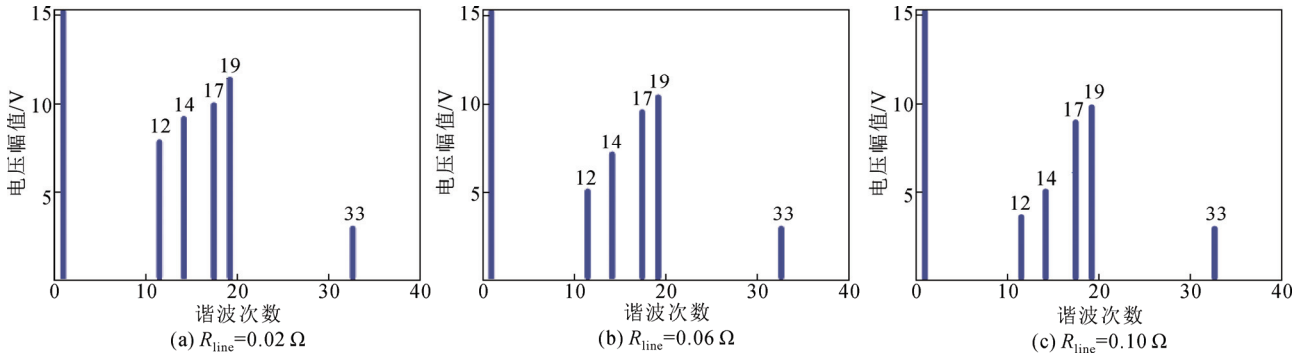


图 23　R_{line} 变化时节点电压频谱图

Fig.23　Frequency spectrum of node voltage when R_{line} changes

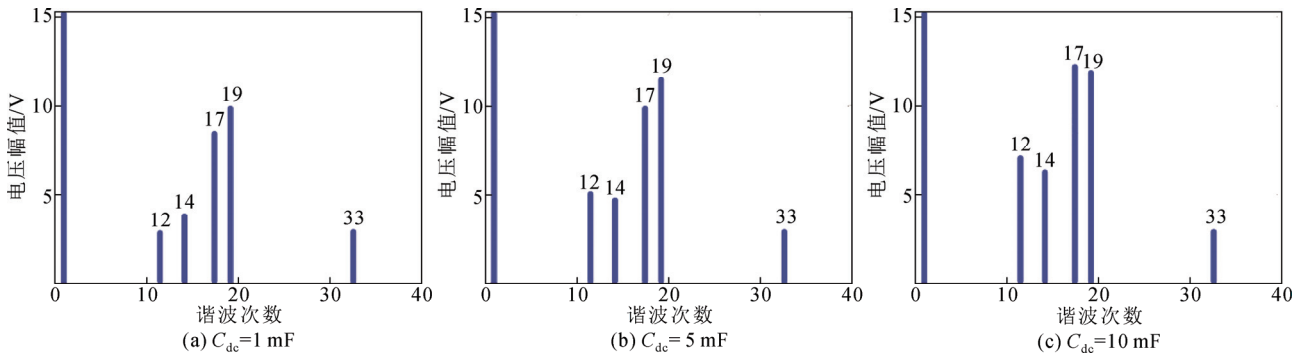


图 24 直流母线电容 C_{dc} 变化时节点电压频谱图

Fig.24 Frequency spectrum of node voltage when DC Bus capacitors C_{dc} changes

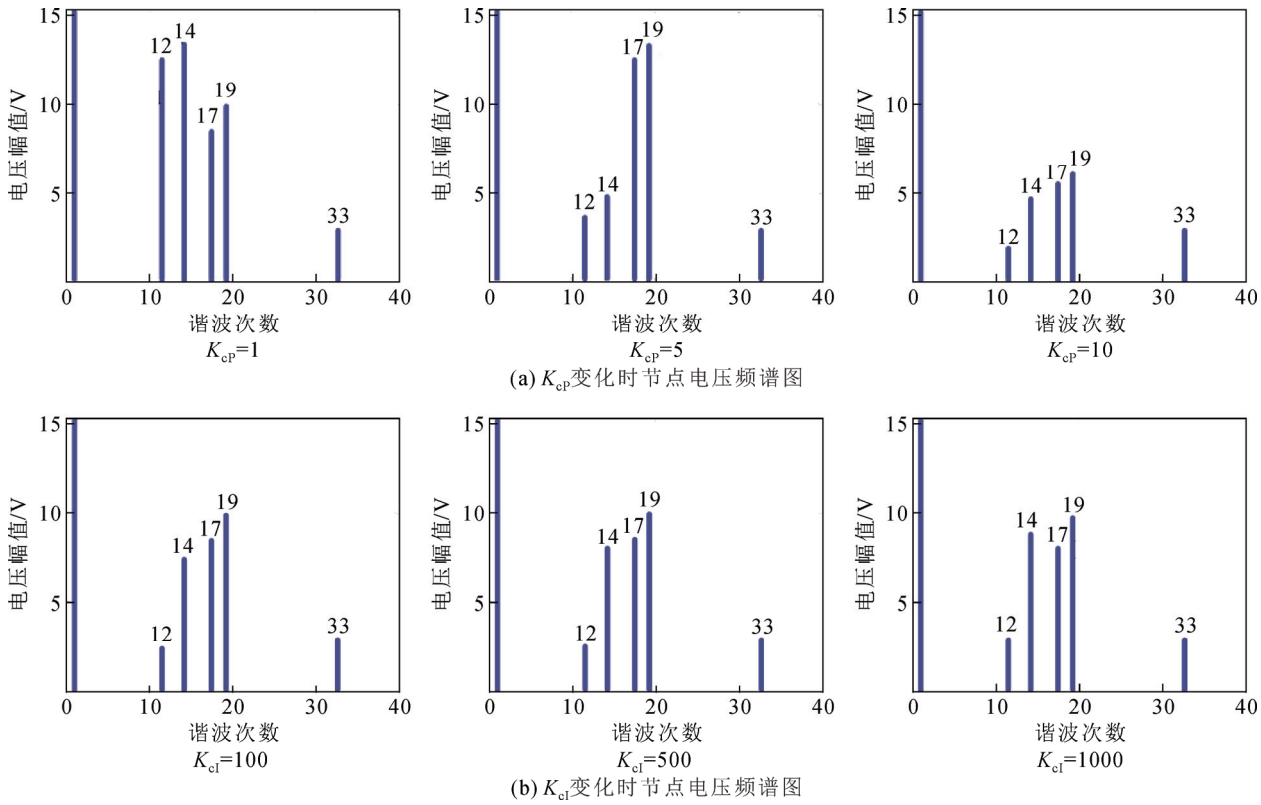


图 25 Boost 变流器控制参数变化时节点电压频谱图

Fig.25 Frequency spectrum of node voltage when Boost converter control parameters changes

先增加后减小且变化幅度大，谐振频率增大；高频谐振峰基本不变。(2)随着 K_{cI} 增加，系统低频谐振峰值增大但变化幅度小，谐振频率基本不变；中高频谐振峰及谐振频率基本不变。与 3.2.6 节结论一致。

5 结论

本文提出了直流子网和 ILC 的融合等效阻抗建模方法，并建立了交直流混合微电网系统整体等效阻抗模型，并在此基础上通过模态分析法研究系统的谐振特性，克服了建模困难的问题；同时，重点研究了 ILC 及直流子网参数变化对系统谐振特性的影响，为系统的参数设计以及后续研究系统的谐振抑制提供了方向，主要结论如下：

1）直流子网和 ILC 的融合等效阻抗建模方法无需建立复杂的传递函数，解决了交直流混合微电网中多台变流器并联的直流子网及交流子网联合建模困难的问题，是考虑直流子网参数影响的交直流混合微电网谐振特性分析的基础。

2）考虑直流子网参数时，低、中频谐振峰值大幅增大，其谐振频率左移；高频谐振峰值和频率

基本不变。

3）直流子网中，对谐波谐振模态的影响较大的有：Boost 变流器电感 L_b、直流母线电容 C_{dc} 增大会导致低，中频谐振峰值增大，电容的增大同时会导致低、中频谐振频率减小。CPL 参考功率 P_{ref}、光伏个数 m、线路电阻 R_{line}、控制器比例系数 K_{cP} 增大会导致低频谐振峰值减小，同时 K_{cP} 增大会导致低中频谐振频率增大以及中频谐振峰值先增大后减小。通过调整上述主电路或控制器参数，减小模态阻抗幅值，可以减弱谐波谐振影响。

对于交直流混合微电网系统谐振特性的研究工作，可以进一步考虑多种控制策略下储能以及各种负载的接入对于谐振特性的影响。同时，交直流混合微电网系统的谐振抑制问题也亟待研究。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 杨新法，苏　剑，吕志鹏，等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：57-70.
YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview of micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] DRAGIČEVIĆ T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids—Part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3528-3549.

[3] LIU Q, CALDOGNETTO T, BUSO S. Review and comparison of grid-tied inverter controllers in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7624-7639.

[4] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid AC-DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1374-1382.

[5] 贾利虎. 交直流混合微电网拓扑与控制策略研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
JIA Lihu. Research on topology and control strategy of the hybrid AC/DC microgrid[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[6] CHENG P T, CHEN C A, LEE T L, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 805-815.

[7] 姜齐荣，王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(22)：7185-7200.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200.

[8] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1586-1593.

[9] 许德志，汪　飞，阮　毅，等. 多逆变器并网系统输出阻抗建模与谐波交互[J]. 电机与控制学报，2014，18(2)：1-7.
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi, et al. Output impedance modeling and harmonic interactions of multiple inverters grid-connected system[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(2): 1-7.

[10] 杨　苓，陈燕东，周乐明，等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(13)：3792-3804.
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804.

[11] 周乐明，罗　安，陈燕东，等. 单相 LCL 型并网逆变器功率控制及有源阻尼优化方法[J]. 电工技术学报，2016，31(6)：144-154.
ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A single-phase grid-connected power control and active damping optimization strategy with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 144-154.

[12] 刘　洋，帅智康，李　杨，等. 多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(14)：4156-4164.
LIU Yang, SHUAI Zhikang, Li Yang, et al. Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4156-4164.

[13] 舒万韬，洪芦诚，刘宁波，等. 多逆变器并网谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(17)：5009-5019.
SHU Wantao, HONG Lucheng, LIU Ningbo, et al. An analysis on resonance characteristics of multi-inverters grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5009-5019.

[14] 李建文，阮筱菲，李永刚，等. 弱电网下多 LCL 型并网逆变器谐振模态分析[J]. 太阳能学报，2021，42(2)：346-355.
LI Jianwen, RUAN Xiaofei, LI Yonggang, et al. Resonance modal analysis for multiple LCL-type grid-connected inverters in weak grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 346-355.

[15] 林　刚，李　勇，王姿雅，等. 直流微网谐振模态分析及有源阻尼抑制方法[J]. 电力自动化设备，2019，39(4)：119-125，132.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance modal analysis and active damping suppression method for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 119-125, 132.

[16] 李鹏飞，郭　力，王洪达，等. 直流微电网高频振荡稳定问题的降阶建模及分析[J]. 电力自动化设备，2021，41(5)：65-72.
LI Pengfei, GUO Li, WANG Hongda, et al. Reduced-order modeling and analysis of high-frequency oscillation stability in DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 65-72.

[17] 郑凯元，杜文娟，王海风. 聚合恒功率负荷对直流微电网稳定性影响的阻抗法分析[J]. 电网技术，2021，45(1)：134-143.
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. DC microgrid stabilityaffected by aggregated constant power loads based on impedance method[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 134-143.

[18] 刘鑫蕊，孙浩楠，曹传超，等. 弱电网下基于功率前馈的光伏并网逆变器稳定性分析[J]. 控制与决策，2022，37(4)：989-996.
LIU Xinrui, SUN Haonan, CAO Chuanchao, et al. Stability analysis of grid-connected photovoltaic inverter based on power feedforward under weak grid condition[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 989-996.

[19] 黄旭程，何志兴，伍文华，等. 交直流微电网中变换器级联系统稳定性分析与协同控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(5)：1432-1442.
HUANG Xucheng, HE Zhixing, WU Wenhua, et al. Stability analysis of converters cascade system in the hybrid AC/DC microgird and coordinative control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1432-1442.

[20] 田　波. 交直流混合微电网建模与变流器控制技术研究[D]. 济南：

山东大学，2014.
TIAN Po. Research on modeling and control strategy of hybrid AC/DC microgrid[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2014.

[21] 刘欣博，刘　宁，宋晓通，等. 基于交流恒功率负载特性的交直流混合微电网系统大信号稳定性判据[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3441-3451.
LIU Xinbo, LIU Ning, SONG Xiaotong, et al. Large-signal stability criteria of AC/DC hybrid microgrid based on AC constant power loads[J]. High Votage Engineering, 2021, 47(10): 3441-3451.

[22] 付　媛，邵馨玉，李　浩. 直流配电网的暂态电压稳定控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1354-1362.
FU Yuan, SHAO Xinyu, LI Hao. Transient Voltage Stability Control Strategy of DC Distribution Network[J]. High Votage Engineering, 2021, 47(4): 1354-1362.

[23] MOHAN N, ROBBINS W P, IMBERTSON P, et al. Restructuring of first courses in power electronics and electric drives that integrates digital control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 429-437.

[24] 熊维富. 交直流混合微网互联变流器的控制策略研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.
XIONG Weifu. Research on control strategy of AC / DC hybrid microgrid interconnected converter[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2018.

[25] 吴文进，苏建徽，汪海宁，等. 光伏并网逆变器受控源等效模型与谐振机理分析[J]. 太阳能学报，2020，41(1)：92-100.
WU Wenjin, SU Jianhui, WANG Haiming, et al. Photovoltaic grid-connected inverter controlled source equivalent model and its resonance mechanism analysis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 92-100.

[26] HUANG Z Y, CUI Y, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 222-231.



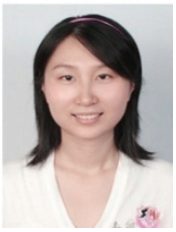
杨向真
1982—，女，博士，副教授，硕导
研究方向为分布式发电及微电网系统技术
E-mail: greenleaf_yxz@163.com

YANG Xiangzhen
Ph.D.
Associate professor



张徐进博
1997—，男，硕士生
研究方向为分布式发电及微电网系统技术
E-mail: 546022308@qq.com

ZHANG Xujinbo



杜　燕(通信作者)
1978—，女，博士，副教授，副研究员
主要从事新能源与分布式发电、微电网等方面的研究工作
E-mail: dydf@sina.com

DU Yan
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2021-10-28　修回日期　2022-10-28　　编辑　陈　蔓

附录 A

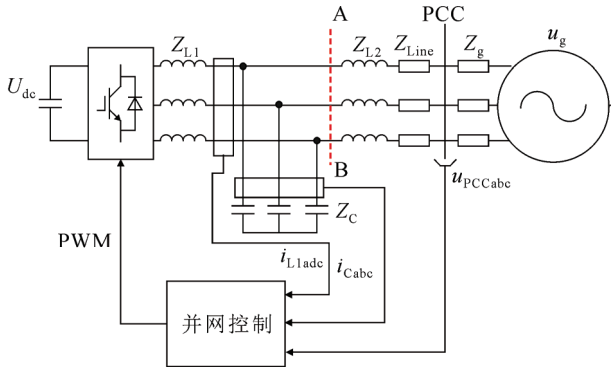


图 A1　LCL 型并网逆变器系统结构图

Fig.A1　System structure of grid-connected inverter with LCL filter

表 A1　逆变器及 ILC 参数表

Table A1　Inverter and ILC parameter table

参数	逆变器 1/逆变器 2/ILC
电网电压有效值 U_g/V	220
电网阻抗 L_g/mH	1
直流母线电压 U_{dc}/V	700
电网频率 f_g/Hz	50
逆变器侧电感 L_1/mH	3/1/4
滤波电容 C/uH	30/20/40
网侧电感 L_2/mH	0.6/0.2/0.5
交流单元线路电感 L_{Line}/mH	0.5/0.5/0.5
PI 控制器比例系数 K_P	2.6/2.6/9
PI 控制器积分系数 K_I	40/40/40
开关频率 f_s/kHz	10/10/10
CPL 参考功率 P_{ref}/W	4900
交流负载 Z_{Load}/Ω	20
Boost 变流器输入电感 L_b/mH	1.2
直流单元线路电阻 R_{Line}/Ω	0.02
直流子网分布式电源参考电压 U_{ref}/V	100

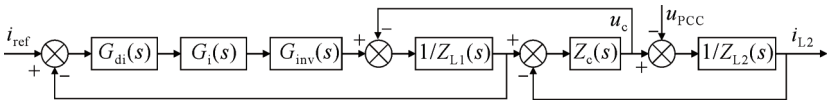
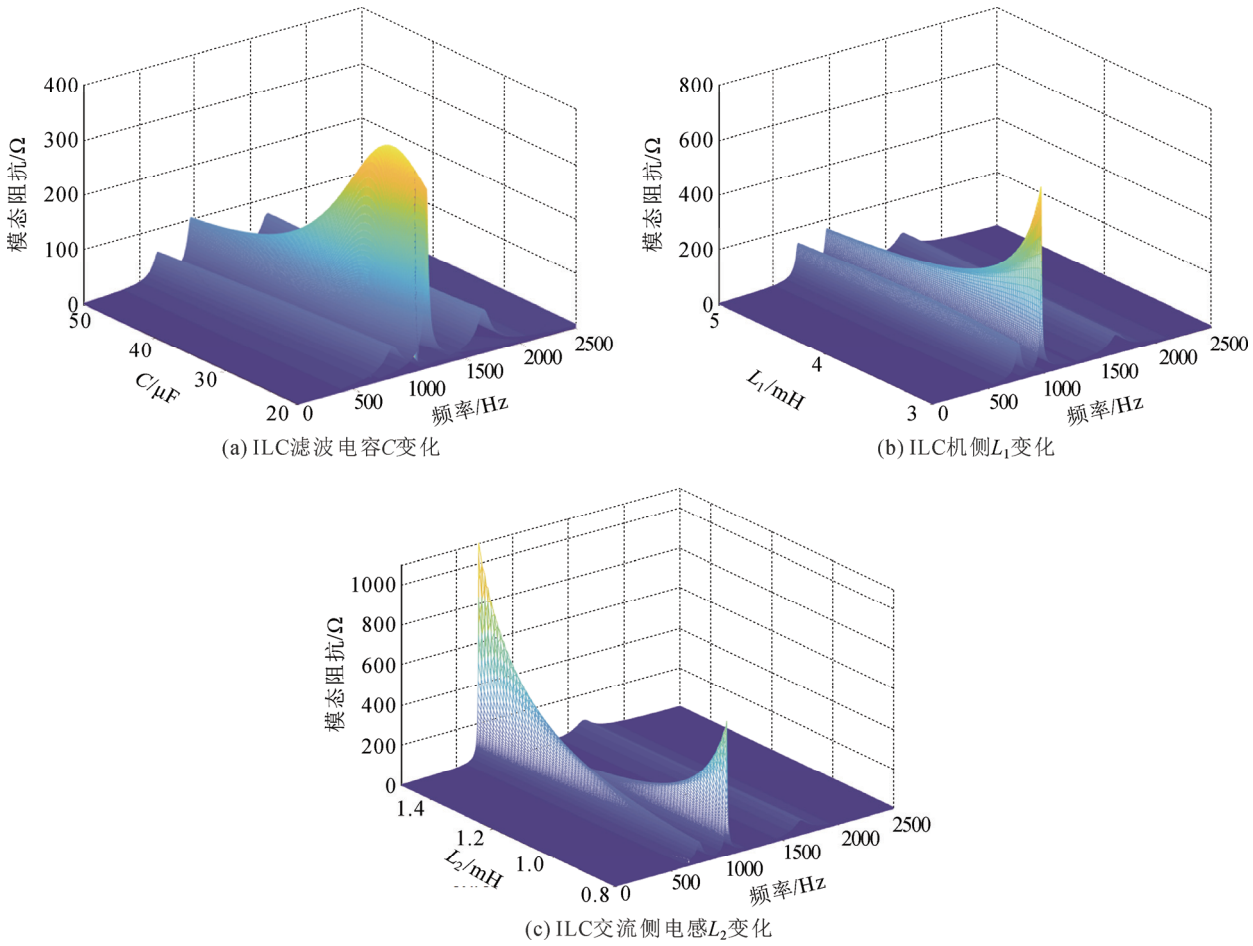


图 A2　LCL 型并网逆变器控制框图

Fig.A2　Control block diagram of LCL grid connected inverter

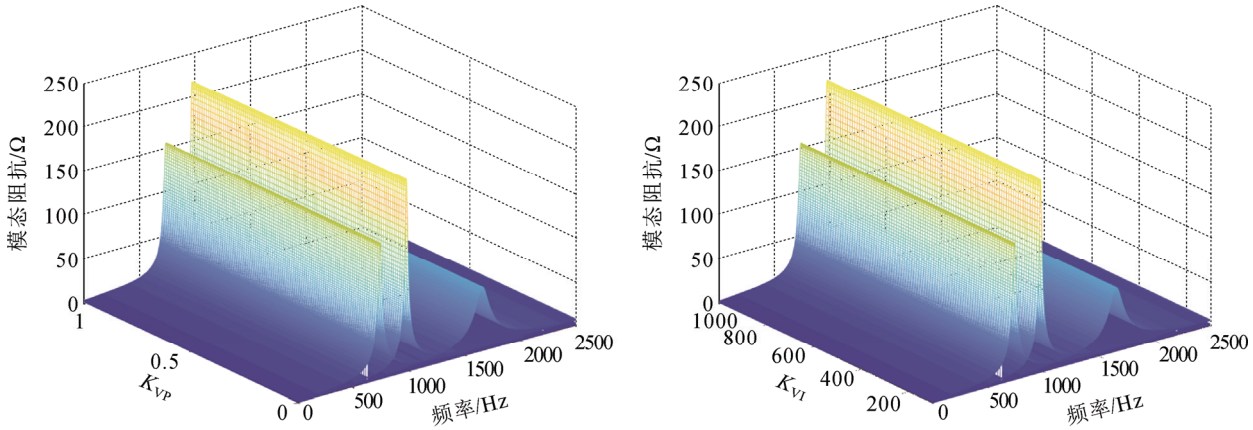


(a) ILC滤波电容C变化　(b) ILC机侧L_1变化

(c) ILC交流侧电感L_2变化

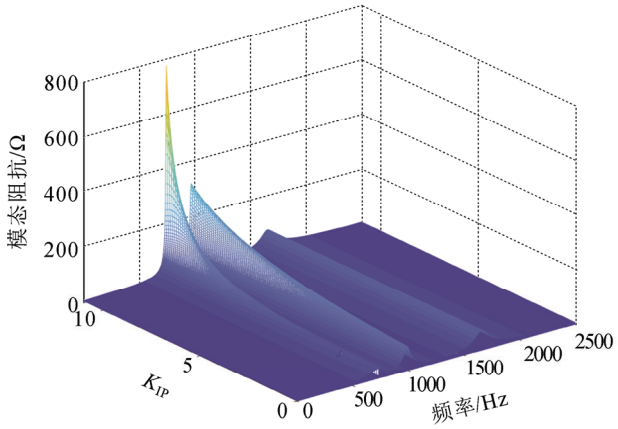
图 A3　LCL 滤波器参数对谐振特性的影响

Fig.A3　Influence of LCL filter parameters on resonance characteristics

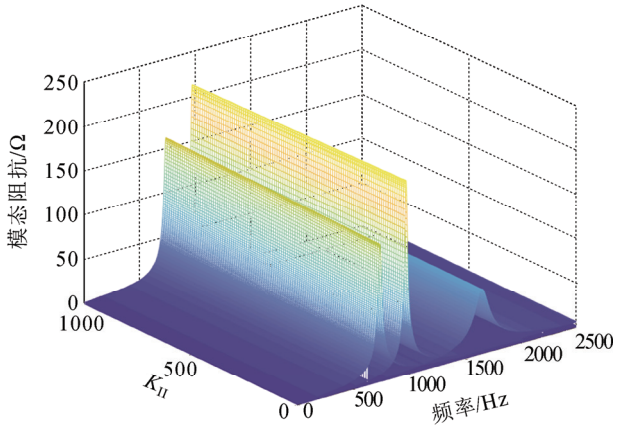


(a) ILC电压控制器比例系数K_{VP}变化的影响

(b) ILC电流压控制器积分系数K_{VI}变化的影响



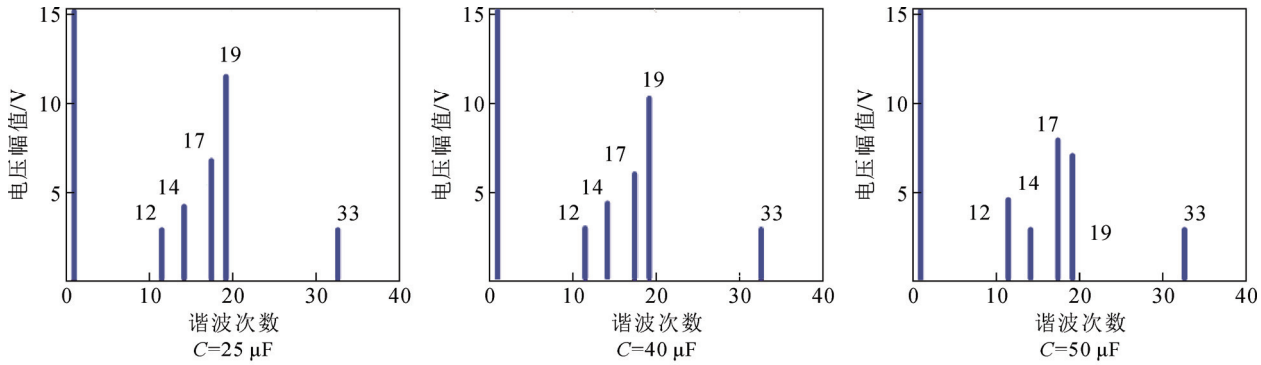
(c) ILC电流控制器比例系数K_{IP}变化的影响



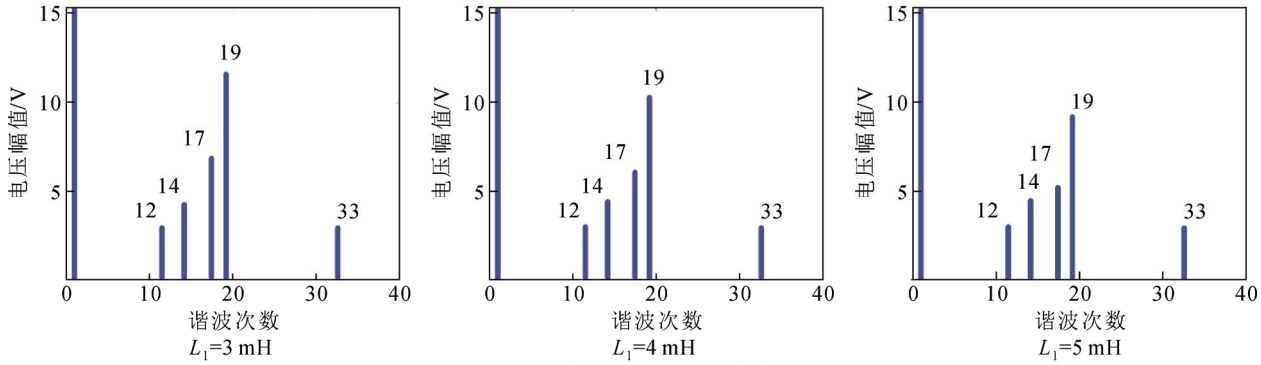
(d) ILC电压控制器积分系数K_{II}变化的影响

图 A4　控制器参数对谐振特性的影响

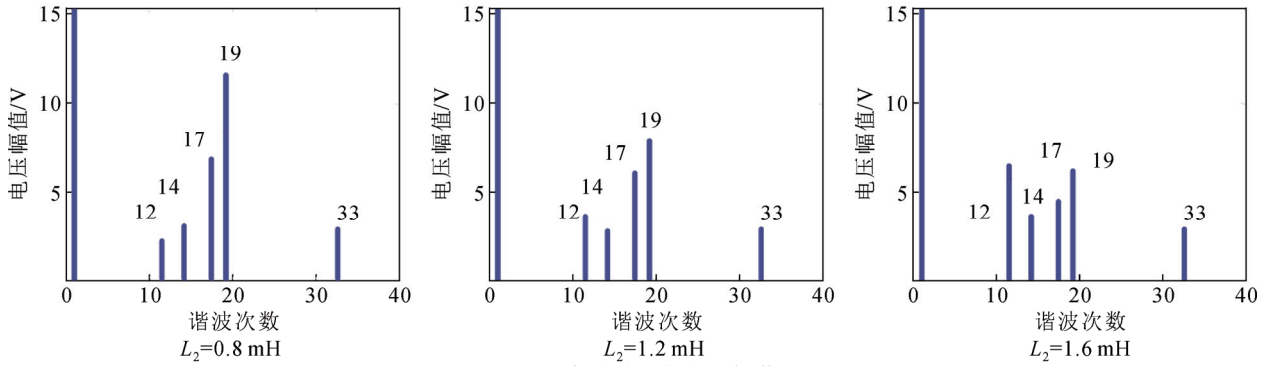
Fig.A4　Influence of controller parameters on resonance characteristics



(a) C变化时节点电压频谱图



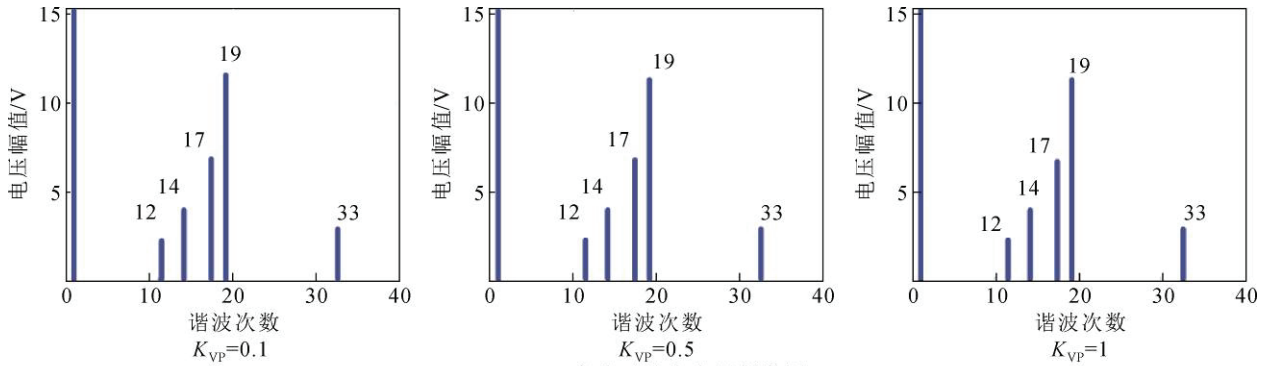
(b) L_1变化时节点电压频谱图



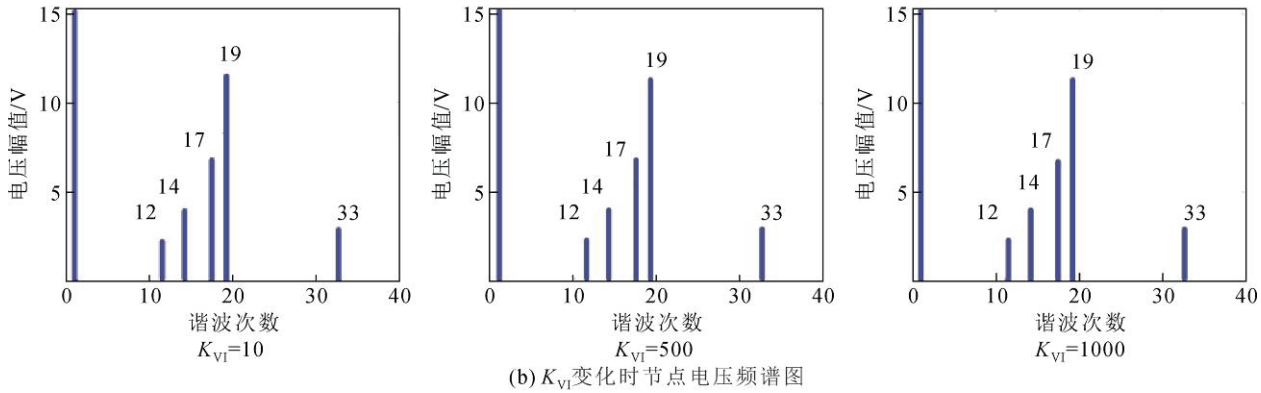
(c) L_2变化时节点电压频谱图

图 A5　ILC 的滤波器参数变化时节点电压频谱图

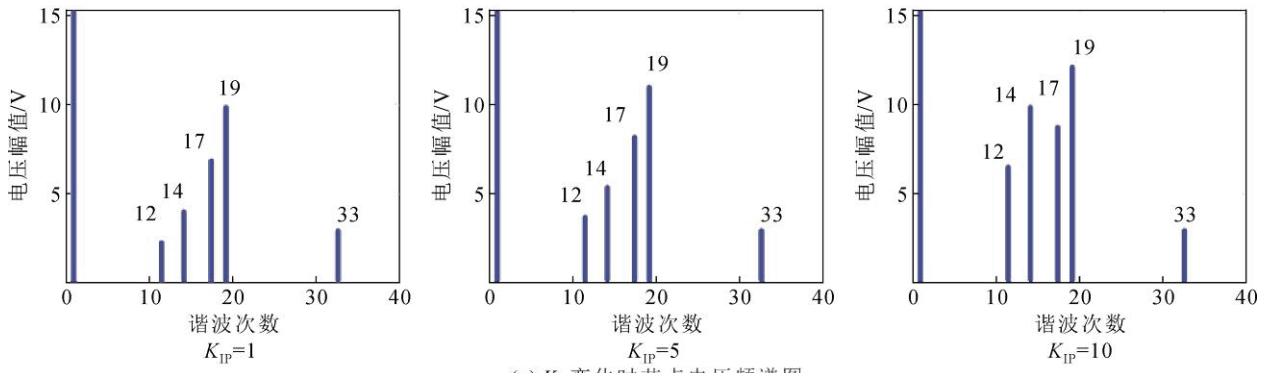
Fig.A5　Frequency spectrum of node voltage when Filter parameters of ILC changes



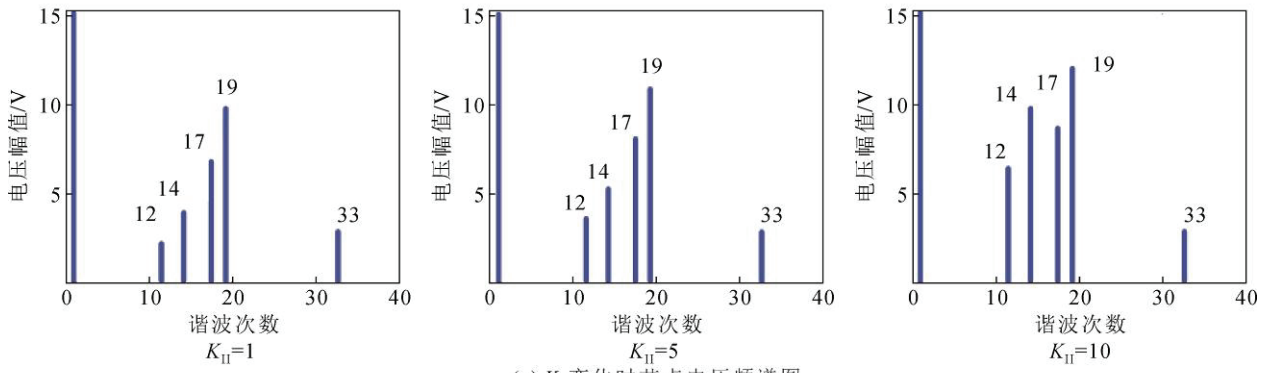
(a) K_{VP}变化时节点电压频谱图



(b) K_{VI}变化时节点电压频谱图



(c) K_{IP}变化时节点电压频谱图



(c) K_{II}变化时节点电压频谱图

图 A6　ILC 控制器参数变化时节点电压频谱图

Fig.A6　Frequency spectrum of node voltage when controller parameters of ILC changes