

# 新能源电站集电馈线对多变流器并网运行稳定性的影响

严亚兵<sup>1</sup>, 苗 森<sup>2</sup>, 袁小明<sup>1</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北省武汉市 430074;

2. 国网青海省电力公司, 青海省西宁市 810000)

**摘要:** 风电、光伏等新能源电站中集电系统馈线的分布参数对各个基于 LCL 滤波器的发电单元变流器谐振特性影响较大, 这给变流器控制系统设计带来挑战。为了分析集电系统馈线对多变流器并联运行稳定性的影响, 在复频域中采用运算电路的节点导纳矩阵建立了多机系统的数学模型, 并分析了模型频率函数特性。分析结果表明, 集电系统中不同馈线类型下拓扑形式与馈线长度对变流器的稳定性影响存在较大区别, 基于 MATLAB/Simulink 平台的仿真分析验证了相关结论。

**关键词:** 多变流器并网系统; 电流控制环; 集电系统; 拓扑; 新能源

## 0 引言

以风电、光伏为代表的新能源发电在世界范围内得到了广泛认可与快速发展<sup>[1]</sup>。但由于太阳能与风能空间分布广、功率密度低, 发电厂内发电单元空间分布较为分散, 需通过集电系统接入厂内变电站。同时, 新能源发电单元通过电力电子变流器实现并网。这就在新能源电站内构成了一个通过集电系统相互耦合的多并网变流器并联运行系统。这一复杂多机并联运行环境使得并网变流器的稳定运行面临新的挑战<sup>[2-3]</sup>。

变流器的设计中通常假定变流器接入理想电压源表示的电网。而在此理想条件下设计的变流器在接入电网等效内抗不为零、多机并列运行的非理想电网环境时, 其各控制环路可能失稳<sup>[4-7]</sup>。电流控制环路作为变流器控制算法的重要组成部分, 其运行的稳定性与其所接入的系统环境关系紧密。由于实际系统环境极其复杂, 如何确保所设计的电流控制器在非理想电网环境中稳定运行仍然是一个极具挑战的难题。

目前已有部分文献对非理想电网环境下的电流环稳定性进行了相关研究。文献<sup>[6]</sup>指出长电缆所引入的分布电容可能造成变流器电流环失稳。当变流器接入内抗不为零的电网时, 电网内抗将引起变

流器 LCL 滤波器的谐振点发生偏移, 并引起振荡问题<sup>[8]</sup>。除针对单变流器并网稳定问题的研究外, 也有学者针对风电、光伏、微网等应用场景分析多变流器并网系统的稳定性问题<sup>[9-14]</sup>。文献<sup>[9, 12]</sup>利用阻抗法建立了多变流器并网系统模型以用于分析系统的稳定性。文献<sup>[10, 13]</sup>利用多变量控制理论建立了多变流器并网系统的模型, 分别考察了多机间的相互作用与变流器台数对系统稳定性的影响。这些研究为多变流器并网系统的稳定性分析做出了开拓性的工作。

多变流器并网系统的稳定性与其运行的电网环境紧密相关。光伏/风电场内各变流器通过复杂的集电系统相连接。集电系统中馈线分布参数会影响变流器的 LCL 谐振特性, 从而对其稳定性造成影响<sup>[8, 15]</sup>。但目前较少有文献关注连接各变流器的馈线所采用的线路类型、拓扑形式与馈线长度对设备稳定性的影响。故有必要更为全面地考察光伏/风电场内集电系统馈线对多变流器并网系统稳定性的影响。

本文利用复频域中运算电路的节点导纳矩阵建立了光伏/风电场内多变流器并网系统频域模型。以一个 5 台并网变流器并联运行的系统为例, 分析了集电系统中馈线的拓扑形式与长度对变流器电流环稳定性的影响, 并采用基于 MATLAB/Simulink 平台的详细仿真模型验证了相关结论。

## 1 系统建模

考察青海省部分新能源电站, 可得到电站通常采用的电气结构如图 1 所示。电站内各发电单元通

收稿日期: 2015-08-15; 修回日期: 2016-01-05。

上网日期: 2016-03-17。

国家自然科学基金重大项目(51190104); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215100); 国家电网公司科技项目(522830140003)。

过光伏电池或风机将太阳能或风能转化为电能,并利用电力电子变流器实现并网,而后通过机端变压器将电压等级提升至 35 kV,再利用集电馈线连接至主变压器,最后通过主变压器升压后送至外部电网。

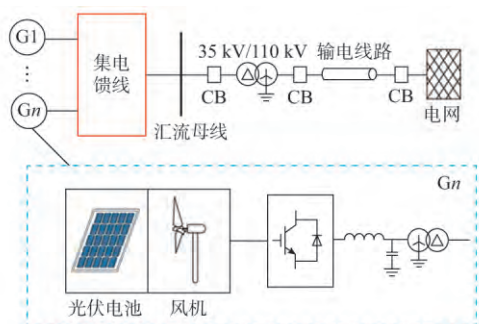


图 1 新能源电站电气结构  
Fig.1 Structure of renewable energy power plant

本文主要研究光伏/风电场内集电系统对变流器电流控制稳定性的影响,在建模中将对电站内变流器与集电系统进行详细建模。对于外部电网则采用理想电压源串接等效内抗的形式进行模拟。

### 1.1 光伏/风电场集电系统简介

集电系统是汇集发电单元输出电能的电力连接系统。其设计中需根据成本、可靠性、厂址地形地貌等因素选择相应的馈线拓扑与馈线类型。在实际现场中采用的拓扑有辐射式、链型、环形或多种拓扑混合型等<sup>[16-17]</sup>。对于馈线类型的选择,光伏电站通常采用电力电缆,风电场则根据地形不同,可能采用架空线或电力电缆。但二者分布参数有较大不同,故在研究中将分两种情况对比馈线对变流器稳定性的影响。

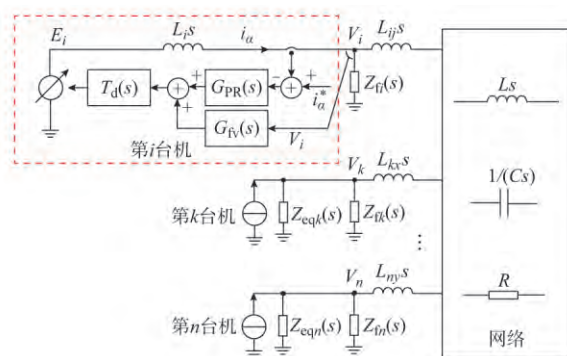
系统中不同拓扑特性不同,混合型拓扑则兼具各类拓扑的特性。本文为独立考察各类型拓扑对多变流器并网系统稳定性的影响,分析中暂不考虑混合型拓扑。辐射式拓扑在容量较小的光伏电站应用较多,链型拓扑则以其较低的成本而比环形拓扑应用更广,故在后续分析中将重点对比这两类拓扑对多变流器并网系统稳定性的影响。下文将以一个 5 机系统为例进行具体分析,分析采用的两种拓扑见附录 A 图 A1。

本文在对集电系统的建模中,主要考虑发电单元侧的箱变、馈线与电站主变。其中变压器主要考虑其电抗的影响。馈线采用  $\pi$  型等效电路进行建模<sup>[18]</sup>。

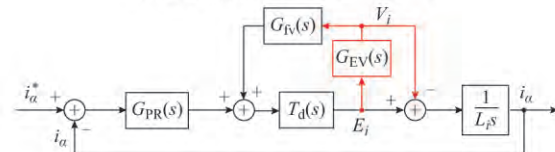
### 1.2 多变流器并网系统建模

本文主要关注多变流器并网系统中变流器电流环的稳定性,故在建模中忽略外环控制。 $dq$  旋转坐

标系下的双环控制是目前较为主流的电流控制方案,且  $dq$  坐标系下的双环控制与静止坐标系下的比例谐振(proportional-resonance, PR)控制具有一定的内在统一性。为简化分析,本文中电流控制采用静止坐标系下的 PR 控制<sup>[19]</sup>。在分析系统的小干扰稳定性时,假定网络中的动态元件处于零状态下。在忽略开关过程后,可得到系统在复频域中的运算电路示意图如图 2(a)所示。图中虚线框内为采用 PR 控制的第  $i$  台变流器。其余 4 台变流器采用诺顿等效模型。



(a) 多变流器并网系统的运算电路示意图



(b) 第  $i$  台变流器的简化控制框图

图 2 多机系统的频域建模

Fig.2 Frequency domain modeling of multi-converter system

图中: $Z_{fi}(s)$ ,  $Z_{fk}(s)$ ,  $Z_{fn}(s)$  分别为第  $i, k, n$  台变流器交流侧电容滤波支路的运算阻抗;  $L_{ij} s$ ,  $L_{kx} s$ ,  $L_{ny} s$  分别为第  $i, k, n$  台变流器与外部网络节点间的运算互阻抗;  $i_a^*$  与  $i_a$  分别为静止坐标系下变流器电流环  $\alpha$  轴的电流指令值与实际值;  $L_i$  为第  $i$  台变流器的变流滤波电感。

图 2(a)中  $G_{PR}(s)$  为比例谐振控制器的传递函数,具体形式如式(1)所示。端电压前馈通过采样变流器输出端电压经滤波后叠加至数字控制器的输出端,这一控制思想可以有效地抑制电网电压扰动对电流控制的影响,图 2(a)中  $G_{EV}(s)$  即表示端电压前馈通道中的低通滤波器,其具体表达式如式(2)所示。传递函数  $T_d(s)$  用于模拟数字控制所造成的延迟,其具体表达式如式(3)所示。 $Z_{eqk}(s)$  与  $Z_{eqn}(s)$  为变流器输出端的驱动点阻抗。当第  $k$  台变流器与第  $n$  台变流器的控制器参数与滤波器参数完全一致时,  $Z_{eqk}(s)$  与  $Z_{eqn}(s)$  相等,其具体表达式如式(4)所示。

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (1)$$

式中:  $k_p$  和  $k_i$  分别为比例和积分常数;  $\omega_1$  为基波角频率。

$$G_{fv}(s) = \frac{\alpha_f}{s + \alpha_f} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_f$  为端电压前馈低通滤波的截止角频率, 本文分析中选用 5 000 rad/s。

光伏/风电场内的发电单元一般采用大功率变流器, 开关频率较低, 而数字控制所导致的延迟对设备的稳定性具有很大的影响。为此, 本文采用二阶 Pade 逼近模拟数字控制所造成的延迟。

$$T_d(s) = \frac{1 - \frac{T_d}{2}s + \frac{T_d^2}{12}s^2}{1 + \frac{T_d}{2}s + \frac{T_d^2}{12}s^2} \quad (3)$$

式中:  $T_d$  为数字控制所造成的延迟时间, 选为 1.5 倍的开关周期。

$$Z_{eq}(s) = \frac{L_i s + G_{PR}(s) T_d(s)}{1 - G_{fv}(s) T_d(s)} \quad (4)$$

根据线性电路的特性, 在分析图 2(a) 中虚线框内变流器的稳定性时, 可将图中其余的理想电流源与电压源视为干扰源并暂时忽略, 由此可将图 2(a) 化简为图 2(b)。此时网络仅有一个受控电压源, 故该网络中各个节点的电压与该受控电压源输出的变流器内电势  $E_i$  成线性关系。图 2(b) 中红色框内的传递函数  $G_{EV}(s)$  表示了  $E_i$  与设备端电压  $V_i$  的线性关系。

由于 5 机系统含有复杂的网络结构, 难以直接求得  $G_{EV}(s)$  的表达式。本文在分析中, 利用节点导纳方程获得端电压节点电压  $V_i$  与内电势  $E_i$  的传递函数。考虑图 2(a) 所示多机系统为一个  $n$  节点网络, 除第  $i$  台变流器外, 其他电流源开路, 则注入网络各个节点的电流向量为:  $i = [0, \dots, E_i/(L_i s), \dots, 0]^T$ 。通过节点导纳方程, 可得到各个节点的电压表达式如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}}_{Z_{n \times n}}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ E_i/(L_i s) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: 节点电压向量  $V = [V_1, \dots, V_i, \dots, V_n]^T$ ; 阻抗矩阵  $Z_{n \times n}$  为导纳矩阵的逆, 对于分析采用的两种拓

扑形式所对应电路与节点导纳方程详见附录 B。

由式(5)可求得变流器端电压  $V_i$  与内电势  $E_i$  的传递函数关系如式(6)所示。

$$G_{EV}(s) = \frac{V_i}{E_i} = \frac{Z_{ii}(s)}{L_i s} \quad (6)$$

根据图 2(b) 可得到待研究变流器的电流控制环的开环传递函数  $G_i(s)$ , 其具体形式如式(7)所示。通过对  $G_i(s)$  的分析即可获得设备的稳定性信息。后文的分析中, 将在这一基础上研究不同拓扑与馈线类型及长度变化对变流器稳定性的影响。

$$G_i(s) = \frac{G_{PR}(s) T_d(s) (1 - G_{EV}(s))}{L_i s (1 - G_{fv}(s) T_d(s) G_{EV}(s))} \quad (7)$$

## 2 馈线对变流器稳定性的影响分析

基于上述建模思路, 对附录 A 图 A1 中的两类拓扑分别建立数学模型。根据 G1 至 G5 中各设备电流环的开环传递函数获取其稳定性信息。为简化分析, 假定各变流器控制器与元件参数相同。分析中采用的参数如下。变流器参数: 额定容量 1 MW, 系统频率 50 Hz, 滤波电容 2.40 mF, 电流环参数  $k_i = 6, k_p = 0.72$ , 额定交流电压 315 V, 逆变侧电感 42.11  $\mu$ H, 开关频率 2 100 Hz; 发电单元机端变压器参数: 额定容量 1.25 MW, 短路阻抗百分比 6%, 变比 35 kV/0.315 kV; 发电厂主变压器参数: 额定容量 6.25 MW, 短路阻抗百分比 8%, 变比 110 kV/35 kV; 架空线参数: 分布电容 8.913 nF/km, 分布电阻 0.332  $\Omega$ /km, 分布电感 1.280 mH/km; 电力电缆参数: 分布电容 0.170  $\mu$ F/km, 分布电阻 0.247  $\Omega$ /km, 分布电感 0.672 mH/km。

在变流器设计中, 针对 LCL 谐振点的阻尼方案分为有源阻尼与无源阻尼两类, 本文中仅考虑无源阻尼。无源阻尼中, 阻尼电阻的选取需兼顾效率与稳定性两方面。下文将根据变流器所接入的系统环境选取阻尼电阻, 以确保其稳定运行。同时, 影响电流环稳定性的诸多因素包括控制带宽、电网强弱等。但上述因素已有文献研究, 且并非本文关注的重点。因此, 分析中假定电网内抗值为恒定值, 并设计控制器带宽保证各变流器单独并网时可稳定运行。

### 2.1 架空线连接下馈线拓扑对多变流器并网系统的稳定性影响分析

风电场内的集电系统可能以架空线作为馈线。特别是对位于山区的风电场, 由于地形的限制, 较多地采用架空线。分析中在滤波电容支路上串联 0.32(标么值)的阻尼电阻, 以防止 LCL 谐振造成设备失稳, 且设定连接各发电单元的单段馈线长度为 1.4 km。



辐射式和链型拓扑下设备的电流环开环传递函数特性曲线如图 3 所示。

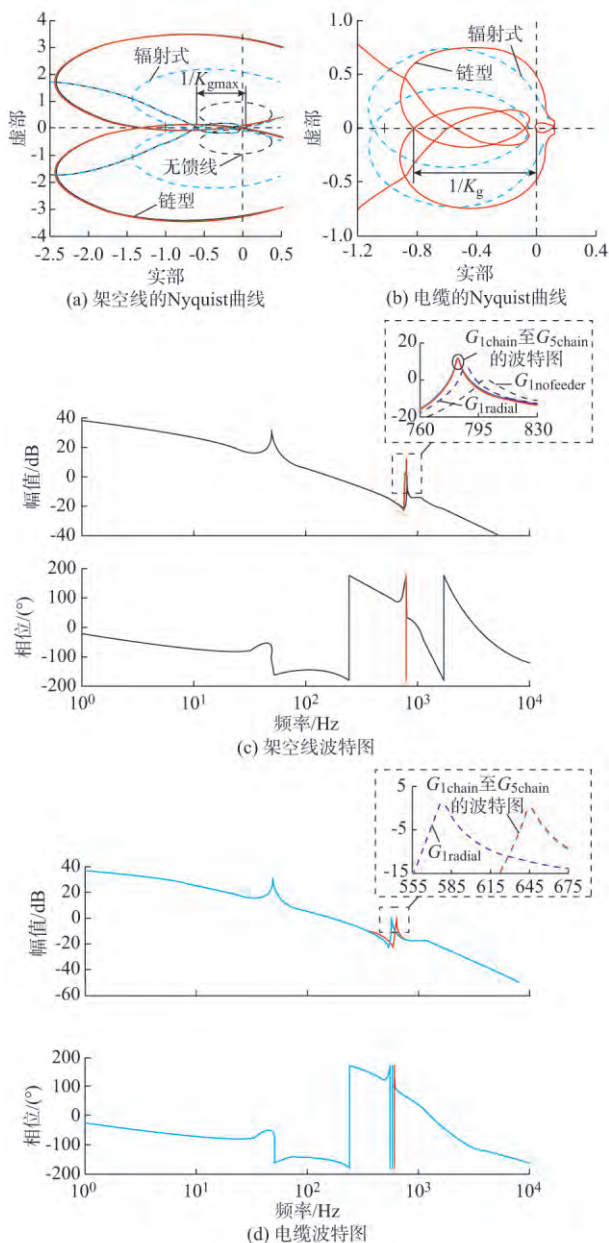


图 3 不同拓扑下采用不同馈线时变流器电流控制开环传递函数特性曲线

Fig.3 Characteristic curve of open transfer function under different topologies with different kinds of feeder

图中以不同线形区分各变流器开环传递函数特性曲线,下标数字则对应附录 A 图 A1 中的机组编号,下标 chain,radial,nofeeder 分别表示链型拓扑、辐射式拓扑与无馈线的案例。对于辐射式拓扑,由于设备控制器与电路参数完全一致,每台设备的开环传递函数特性曲线一致,故图 3(a)与(c)中仅给出了以蓝色作为标识的 G1 开环频率特性曲线  $G_{1radial}$ 。对于链型拓扑,从图 3(c)中波特图在高频

谐振点附近的放大图可看出,各设备的开环波特图仅存在较小差异,故在图 3(a)的链型拓扑中各机组对应 Nyquist 曲线有部分重叠区。为此,后文将统一以 G1 变流器的开环频率特性作为参考,对比两类拓扑对多变流器并网系统稳定性的影响。通过分析,G1 在右半平面没有极点,故后文中将以 G1 所对应的 Nyquist 曲线是否包围  $-1+j0$  来判断系统的稳定。

图 3(a)中的 Nyquist 图显示:馈线拓扑对多机系统的稳定性有一定的影响,采用架空线连接时,同样的参数下,链型馈线拓扑中的变流器较辐射式拓扑中的更容易失稳。图中链型拓扑所对应的 Nyquist 曲线包围  $-1+j0$ ,显示系统失稳,而辐射式拓扑和无馈线时 G1 所对应的 Nyquist 曲线则显示系统稳定。这主要是因为不同的馈线拓扑改变了架空线中分布电感对设备 LCL 滤波器谐振特性的影响。图 3(c)中的波特图显示:辐射式拓扑的系统中设备 LCL 谐振频率较链型拓扑更高,而在选用同样大小的阻尼电阻时,频率更高的谐振点可以得到更有效的阻尼。故采用辐射式拓扑对应的系统更稳定。

拓扑会改变架空线分布参数对设备 LCL 谐振点的影响,而馈线长度则会直接改变分布参数的大小。为考察馈线长度对多变流器并网系统稳定性的影响,分析中,使馈线长度从 0.6 km 变化至 1.6 km,可得到两种拓扑下 G1 变流器的 Nyquist 曲线见附录 A 图 A2。若取 G1 的频率特性图像(Nyquist 图或波特图)所对应的增益裕度  $K_g$  作为评价系统稳定性的指标,则采用架空线连接时,设备增益裕度随馈线长度变化的规律如图 4 所示。

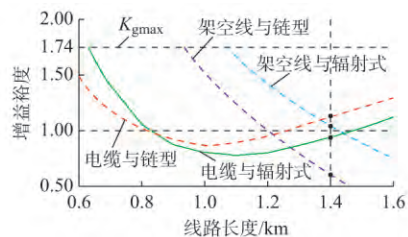


图 4 不同拓扑下馈线长度变化对设备开环传递函数增益裕度的影响

Fig.4 Effect of feeder length on converter gain margin under different topologies

图中  $K_{gmax}$  对应图 3(a)中的标注,为数字控制延迟决定的电流环所能达到的最大增益裕度。从图中可看出当使用架空线时,链型拓扑所对应的设备增益裕度较辐射式拓扑更小,且两种拓扑下,设备的增益裕度随着线路长度的增加而下降。特别的,在架空线长度为 1.4 km 时,辐射式拓扑的增益裕度大

于1,而链型拓扑的小于1,故设备在辐射式拓扑中可稳定运行,但在链型拓扑中会失稳。

## 2.2 电缆连接下馈线拓扑对多变流器并网系统的稳定性影响分析

目前光伏电站较广泛地采用电缆作为集电系统的馈线,也有较多风电场采用电缆作为馈线。电缆与架空线的电气特性存在较大区别,其引入的分布电容远大于架空线。文献[8]的研究表明,分布电容将使网络谐振频率较原有频率更低。当该谐振频率进入电流控制器端电压前馈响应频段范围时,端电压前馈将对网络的谐振具有一定抑制作用。因此,以电缆作为馈线时,不同拓扑对系统稳定性的影响与前文结论存在差异。当选定滤波电容支路上串联的阻尼电阻为0.62(标么值),馈线长度为1.4 km时,可得到不同拓扑下G1变流器开环频率特性曲线如图3(b)与(d)所示。

图3(b)中的Nyquist图显示:同样的参数下,辐射式拓扑中的变流器比链型拓扑中的更容易失稳。图中辐射式拓扑中变流器的Nyquist曲线包围了 $-1+j0$ ,而链型拓扑对应的Nyquist曲线则显示系统稳定。这主要是因为电缆的分布电容使设备LCL谐振点向低频处移动,拓扑则影响分布电容作用的效果。图3(d)显示:辐射式拓扑下,电缆分布电容使得设备LCL谐振频率较链型拓扑更低。故选用同样大小的阻尼电阻时,辐射式拓扑中的变流器更容易失稳。

前文在分析架空线作为馈线时,已证明馈线长度对设备的稳定性具有显著的影响。当以电缆作为馈线时,若同样以G1开环传递函数的增益裕度作为衡量设备稳定性的指标,则同样可得到G1增益裕度随馈线长度变化的规律如图4所示。图4显示:在短馈线时,链型拓扑对应的设备增益裕度小于辐射式拓扑,但随着线路长度的增加,二者的地位发生转变,辐射式拓扑反而较链型拓扑的增益裕度更低。且两种拓扑下,设备的增益裕度都随着线路长度的增加而呈现先减小后增加的趋势。特别的,在电缆长度为1.4 km时,链型拓扑的增益裕度大于1,而辐射式拓扑的小于1,故变流器在辐射式拓扑中无法稳定运行。

## 3 仿真验证

为验证上述分析,本文在MATLAB/Simulink平台下构建基于开关器件的详细仿真模型,仿真中主要参数同第2节。仿真中,变流器在0.75 s进行并网。图5给出了架空线连接时,不同馈线长度下各拓扑中母线的电流波形。从图中可看出,在长度

为0.4 km时,两种拓扑下系统都能稳定运行;当线路长度为1.4 km时,链型拓扑下的系统出现振荡失稳,而辐射式拓扑下的系统仍能稳定运行;当线路长度为2.4 km时,两种拓扑下的系统都已失稳。

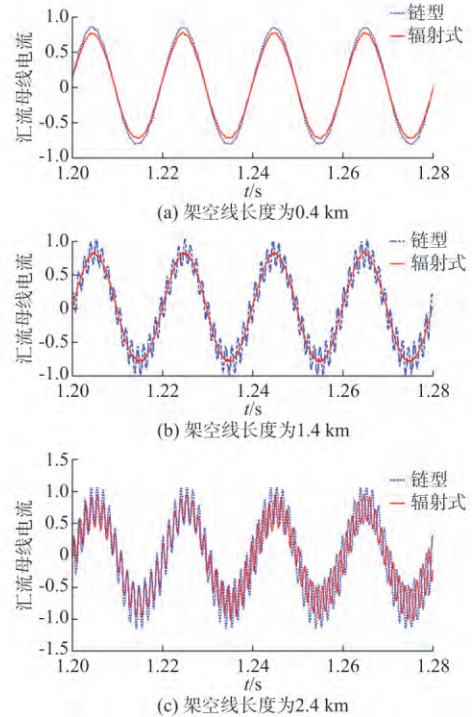


图5 以架空线作为馈线时不同拓扑下母线的电流波形  
Fig.5 AC bus current under different topologies when using overhead line as feeder

图6给出了采用电缆作为馈线时,不同馈线长度下,不同拓扑中汇流母线处的电流波形。图中对应的两种馈线拓扑下,当电缆长度为0.4 km与2.4 km时,变流器可稳定运行;当电缆长度为1.4 km时,辐射式拓扑中的变流器出现振荡失稳,而链型拓扑中的设备仍然可以稳定运行。上述两种仿真所得到的结果与图4中的曲线一致,且验证了前文中的分析结论。

## 4 结论

本文采用复频域中运算电路的节点导纳方程,建立了适用于多变流器并网系统中电流环稳定性分析的频域模型。以一个5台并网变流器并联运行的系统为例,对比分析了集电系统拓扑形式与线路类型对变流器电流环稳定性的影响,结论如下。

1)集电系统中不同类型馈线的分布参数中引起变流器高频谐振特性变化的主导因素不同,其中架空线以其分布电感作为主要影响因素,电缆以其分布电容作为主要影响因素。

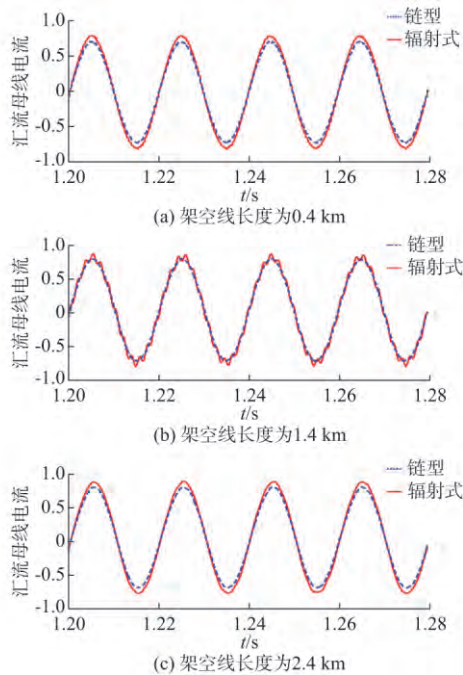


图6 电缆连接时不同拓扑下汇流母线处的电流波形  
Fig.6 AC bus current under different topology when using cable as feeder

2)以架空线作为馈线时,链型拓扑较辐射式拓扑稳定裕度低,且两种拓扑下,设备的增益裕度都随着线路长度的增加而下降。

3)以电缆作为馈线时,当线路较短时,链型拓扑对应的设备增益裕度小于辐射式,但随着线路的延长,辐射式反而较链型拓扑的增益裕度更低。且两种拓扑下,设备的增益裕度都随着线路的延长而先减小后增加。

本文的实例研究揭示了光伏/风电场内集电系统馈线拓扑与线路类型及长度对并网变流器电流环稳定性的影响,可为光伏、风机中变流器的设计提供一定的参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [2] XIAOMING Y. Overview of problems in large-scale wind integrations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22-25.
- [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.

- 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] ZHOU J Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [5] YUNHUI H, XIAOMING Y, JIABING H, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.
- [6] ZHANG S, JIANG S, LU X, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(1): 110-120.
- [7] 雷一,赵争鸣,袁立强,等.LCL滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J].电力系统自动化,2012,36(21):36-40.  
LEI Yi, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Factors contributing to damping of grid-connected photovoltaic inverter with LCL filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 36-40.
- [8] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [9] 许德志,汪飞,毛华龙,等.多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J].中国电机工程学报,2013,33(12):64-71.  
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.
- [10] 胡伟,孙建军,马谦,等.多个并网逆变器间的交互影响分析[J].电网技术,2014,38(9):2511-2518.  
HU Wei, SUN Jianjun, MA Qian, et al. Analysis on interactive influences among multi grid-connected inverters [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2511-2518.
- [11] 马添翼,金新民,黄杏.含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J].电力系统自动化,2013,37(6):12-17.  
MA Tianyi, JIN Xinmin, HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 12-17.
- [12] WANG X, BLAABJERG F, WU W. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [13] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3): 770-785.
- [14] BOLLEN M H, YANG K. Harmonic aspects of wind power integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 14-21.
- [15] DANNEHL J, WESSELS C, FUCHS F W. Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 380-388.
- [16] 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.  
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of



- photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [17] CAMM E H, BEHNKE M R, BOLADO O, et al. Wind power plant collector system design considerations: IEEE PES wind plant collector system design working group[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada.
- [18] KOCEWIAK L H. Harmonics in large offshore wind farms [D]. Aalborg: Aalborg University, 2012.
- [19] XIAOMING Y, MERK W, STEMLER H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2):

523-532.

严亚兵(1989—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:含大规模变流器接入的系统稳定分析与控制。E-mail: yb\_yan@hust.edu.cn

苗 淼(1982—),男,博士,主要研究方向:电力系统稳定与控制。E-mail: miaomiao\_b116@sina.cn

袁小明(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:可再生能源发电设备及其控制、含大规模可再生能源电力系统的控制与保护、大容量变换器工业应用。E-mail: yuanxm@hust.edu.cn

(编辑 章黎)

### Impact of Renewable Power Plant Collector System on Stability of Grid-connected Multi-converters

YAN Yabing<sup>1</sup>, MIAO Miao<sup>2</sup>, YUAN Xiaoming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China)

**Abstract:** The distributed parameters of collector feeders on the photovoltaic and wind farm have an important influence on the resonance of converters based on LCL filters, presenting a challenge to converter control system design. In order to investigate the impact of the renewable power plant collector system on the stability of grid-connected multi-converters, a mathematical model for the multi-converter system is developed using the network admittance matrix in the complex frequency domain, and frequency characteristics are analyzed. It is shown that the influence on the stability of converters varies with topological form and feeder length of different feeder types in the collector system. The validity of the relevant conclusions is verified by simulation results based on MATLAB/Simulink.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51190104), National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215100) and State Grid Corporation of China (No. 52283014003).

**Key words:** grid-connected multi-converter system; current control loop; collector system; topology; renewable energy

(上接第 72 页 continued from page 72)

### Short-term Load Forecasting Support Vector Machine Algorithm Based on Multi-source Heterogeneous Fusion of Load Factors

WU Qianhong<sup>1</sup>, GAO Jun<sup>2</sup>, HOU Guangsong<sup>2</sup>, HAN Bei<sup>1</sup>, WANG Keyou<sup>1</sup>, LI Guojie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation (Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Shanghai 200240, China;

2. Heze Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Heze 274000, China)

**Abstract:** A method to select optimal multiple kernels developed from multiple kernel function is proposed for short-term load forecasting in the big data environment of smart grid, multi-source heterogeneous load factors taken into account. The multiple kernel function is able to describe the distribution characteristics of the factors, cope with their variations and improve the accuracy of load forecasting. Load factors such as historical load, air temperature, air pressure, relative humidity, rainfall, wind direction, wind speed, holidays and electricity price are selected as multi-source heterogeneous factors. Three methods (the sample distribution method, single variable method and rank space diversity method) are adopted to establish optimal multiple kernels, and parallel multiple kernel support vector machine (SVM) load forecasting algorithm is based on double layer multi kernel learning algorithm. A Hadoop cluster is built for conducting experiments of short-term load forecasting. Experimental results show that the average relative error of multiple kernel SVM is smaller than single kernel SVM's, and the accuracy of multiple kernel SVM model based on double layer multiple kernel learning algorithm and norm is the highest. Therefore, multiple kernel SVM can tackle the multi-source heterogeneous data in the load forecasting effectively, and the speed and accuracy of load forecasting can be improved by parallel processing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407116) and National Key Technologies R&D Program (No. 2015BAA01B02).

**Key words:** big data; multi-source heterogeneous characteristics; support vector machine (SVM); load forecasting; paralleling