

基于模态分析的风电场并网谐波谐振研究

唐振东, 杨洪耕

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对风电场并网时易发生的谐波谐振问题, 采用模态分析法对风电场并网系统的节点导纳矩阵进行解耦处理, 并通过特征值分解确定其谐振频率、谐振中心等相关信息。首先建立并网 LCL 逆变器等效诺顿模型和电网等效模型, 基于已建立模型, 采用模态分析法分析风电场并网谐振现象并给出各节点谐振参与因子、谐振中心等谐振信息。基于仿真平台 PSCAD 按照某 99 MW 风电场参数搭建实例仿真模型, 在验证模态分析法可行性的同时, 深入研究随着风电场集电线路长度和风机并网台数改变时的并网谐振各节点参与因子与谐振中心的变化规律。

关键词: 风电场; 并网逆变器; 谐波谐振; 模态分析; 参与因子

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.015

0 引言

风力发电是目前成本最接近常规电力、发展前景最大的可再生能源发电。近年来, 随着风电场开发规模的扩大以及并网技术的发展, 风电并网所引发的并网点电压偏差与波动、电流谐波注入、三相不平衡等电能质量问题愈发受到关注^[1-3]。

为抑制风电场逆变器工作时产生的谐波, 需要在并网逆变器与电网之间加入滤波器, LCL 滤波器因具有较强的高频抑制能力而被广泛使用^[4-5]。但 LCL 滤波器的高阶特性使得多逆变器并网时, 并网系统存在多个谐振点, 严重劣化并网电能质量^[6-7]。多逆变器与电网相互作用而产生的谐振问题目前已成为国内外研究的热点。文献[8-9]建立大型新能源站的诺顿等效模型, 基于所推导的输出电流和并网点电压表达式, 研究了电站中由无功补偿装置、输电线路阻抗等组成的电网阻抗对逆变器并联系统谐振现象及电能质量的影响; 文献[10]为建立更逼近实际系统的并网逆变器输出阻抗模型, 将死区效应和开关器件非理想特性考虑到模型中以增加准确性, 并对多逆变器并网的分布式阻抗网络进行建模和谐波交互分析。

目前, 分析谐波谐振的方法主要有频率扫描法和模态分析法, 前者虽可准确判定谐振频率却难以给出更多的谐振信息^[11-12]。2005 年, 由 Xu 提出的模态分析法将系统节点导纳矩阵进行特征值分解识别出模式谐振频率以及节点参与因子^[13-15], 从而给出更多的谐振抑制、避免等信息。模态分析法已逐渐成为目前分析谐波谐振现象的有效手段, 并被广泛应用于微网谐振以及高速铁路牵引供电系统谐波谐振的分析中, 却尚未被应用于有关风电场并网系统的谐振现象研究中。

基于上述分析, 本文建立风电场逆变器并网等效输出阻抗模型和电网等效模型, 采用模态分析法给出并网系统各节点谐振参与因子值。最后, 依据实例风电场数据, 在 PSCAD 平台中搭建仿真模型, 结果证明模态分析法分析并网谐振现象的可行性。

1 风电场并网拓扑结构

1.1 并网逆变器等效模型

鉴于 LCL 滤波器体积较小且对高频谐波有显著的抑制作用^[16], 含 LCL 滤波器的逆变器被广泛应用于风电场中。单台三相 LCL 逆变器并网控制结构图如图 1 所示。图中, L_g 、 L_{inv} 分别为网侧和逆变器侧电感; C_f 、 C_{dc} 分别为滤波电容和直流侧电容; i_{ga} 、 i_{inva} 分别为网侧和逆变器侧 a 相电流; i_{ca} 为滤波电容 a 相电流; i_{dc} 为直流侧电流。

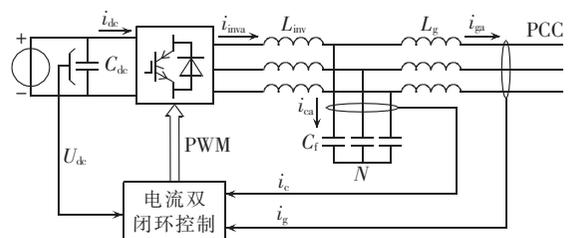


图 1 并网逆变器控制系统结构
Fig.1 Structure of control system for grid-connected inverter

LCL 滤波器的固有谐振尖峰会导致并网逆变器处于无阻尼不稳定状态, 为保证系统能够稳定可靠地工作, 通常采用电容电流内环反馈与并网电流外环反馈相结合的双电流闭环控制策略^[17-18]。依据文献[19], 利用 Clarke 和 Park 矩阵将三相静止坐标系下的并网逆变器数学模型变换到 dq 旋转坐标系下, 同时依据前馈解耦策略可将 d 轴和 q 轴控制回路解耦成为相互独立且完全对称的两部分。逆变器并网系

统控制框图如图 2 所示。其中, i_{ref} 为并网电流参考值; $G_{ig}(s)$ 为并网电流外环控制传递函数, 采用 PI 控制; $G_{ic}(s)$ 为电容电流内环控制传递函数, 采用比例控制; G_{inv} 为逆变器桥路等效增益, 且有 $G_{inv} = U_{in} / U_m$, U_{in} 为输入直流电压, U_m 为 PWM 波幅值。

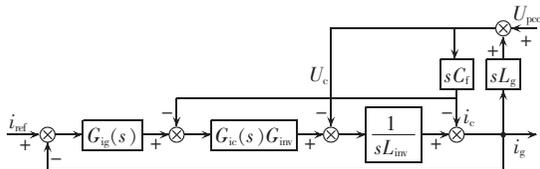


图 2 逆变器并网控制框图

Fig.2 Block diagram of grid-connected inverter control

根据上述双闭环控制框图, 由 Mason 定理推导并网逆变器等效输出阻抗:

$$Z_o(s) = (s^3 L_{inv} L_g C_l + s^2 G_{ic} G_{inv} L_g C_l + s L_{inv} + s L_g + G_o G_{ic} G_{inv}) / (s^2 L_{inv} C_l + s G_{ic} G_{inv} C_l + 1) \quad (1)$$

由式(1)知, 并网 LCL 逆变器输出外特性可等效表示为如图 3 所示的诺顿等效电路。图中, G_o 为受控电流源控制系数。

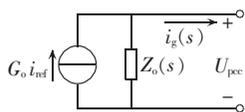


图 3 LCL 逆变器并网诺顿模型

Fig.3 Norton model of grid-connected LCL inverter

1.2 电网模型

可控串联补偿器可以

平滑快速地改变输电线路的阻抗, 具有提高输送功率、改善潮流分布和改善系统动态性能等优点, 因此 110 kV 及以上电压等级的长距离输电网络及其电网可等效为理想电压源^[20-21]。建立电网等效模型如图 4 所示。图中, R_g 为输电线路等效电阻; L_g 为输电线路和变压器等效电感之和; L_{Tn} 为升压变压器 T_n 等效电感; C_{Qn} 、 L_{Qn} 和 R_{Qn} 分别为第 n 个风电机组集群并网时所联结的无功补偿装置总等效电容、等效电感和等效电阻; u_{invn} 为逆变器集群并网电压; u_g 为电网电压。

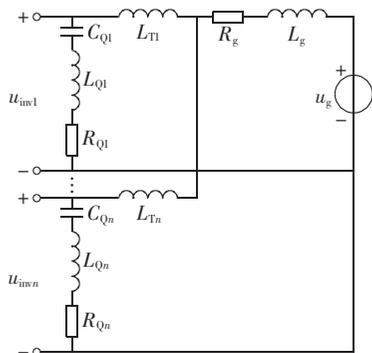


图 4 电网等效模型

Fig.4 Equivalent grid model

2 模态分析法及其指标量

2.1 模态分析法

下面分析模态分析法的核心思想。若系统产生频

率为 f 的并联谐振现象, 其节点电压、电流方程为^[13]:

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f \quad (2)$$

其中, \mathbf{Y}_f 为在频率 f 处的系统节点导纳矩阵; \mathbf{V}_f 和 \mathbf{I}_f 分别为节点电压和节点注入电流向量。

节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_f 可分解如下:

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (3)$$

其中, \mathbf{A} 为对角特征值矩阵, $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$; $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1 \mathbf{L}_2 \dots \mathbf{L}_n]$, $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \dots \mathbf{T}_n]$ 分别为左、右特征向量矩阵, 且有 $\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1}$ 。

将式(3)代入式(2)得:

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{L} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I}_f \quad (4)$$

其中, \mathbf{A}^{-1} 命名为“模态阻抗”。

定义 $\mathbf{U}_f = \mathbf{T} \mathbf{V}_f$ 为模态电压向量, $\mathbf{J}_f = \mathbf{T} \mathbf{I}_f$ 为模态电流向量, 则有 $\mathbf{U}_f = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{J}_f$, 即:

$$\begin{bmatrix} U_{f1} \\ U_{f2} \\ \vdots \\ U_{fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{f1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{f2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{fn}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{f1} \\ J_{f2} \\ \vdots \\ J_{fn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)知, 当系统发生并联谐振时, 某些节点的注入电流将产生很高的节点电压, 即若 $\lambda_{f1} = 0$ 或非常小, 则很小的模态 1 注入电流 J_{f1} 将导致很大的模态电压 U_{f1} , 而其他模态电压不受影响。即在模态域中, 根据特征值倒数易于识别出谐振的位置。

2.2 模态分析法指标量

谐波谐振实际上只在特定的模式下发生, 它与某个节点的注入电流无关也并非由其引起。可将最小的特征值称为谐振“关键模式”, 对应的左、右特征向量则称为“关键特征向量”。

模态电流 J_{f1} 可表示为电流在第一个特征向量上的线性映射, 即:

$$J_{f1} = T_{11} I_{f1} + T_{12} I_{f2} + \dots + T_{1n} I_{fn} \quad (6)$$

由式(6)可知, 若 T_{1n} 有最大值, 则节点电流 I_{fn} 将对模态 1 注入电流具有最大的贡献度, 即节点 n 最容易受到外界激励而产生模态 1 谐振。

同理可得, 模态电压与节点电压间存在关系 $\mathbf{V}_f = \mathbf{L} \mathbf{U}_f$, 则有:

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ \vdots \\ V_{fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ \vdots \\ L_{n1} \end{bmatrix} U_{f1} + \begin{bmatrix} L_{12} \\ L_{22} \\ \vdots \\ L_{n2} \end{bmatrix} U_{f2} + \dots + \begin{bmatrix} L_{1n} \\ L_{2n} \\ \vdots \\ L_{nn} \end{bmatrix} U_{fn} \quad (7)$$

由式(7)可知, 若系统发生模态 1 谐振, 则 U_{f1} 远大于其他模态电压, 此时, 式(7)可近似仅由 $[L_{11} \ L_{21} \ \dots \ L_{n1}]^T U_{f1}$ 来表示。如果 L_{n1} 的值最大, 则节点 n 将会出现最大电压值, 即节点 n 处最容易观测到模态 1 谐振。

综上可得结论: 右特征向量矩阵 \mathbf{T} 反映关键模式下节点的谐振可激励性, 左特征向量矩阵 \mathbf{L} 反映关

键模式下节点的谐振可观测性,在具有最大激励性的节点注入相应信号可有效抑制谐波谐振现象。

实际上,可将可激励性和可观测性结合成为一个新指标量。当系统发生模态 1 谐振时,模态阻抗 $1/\lambda_{j1}$ 的值远大于其他模态阻抗值,则式(4)可简化为:

$$\begin{bmatrix} V_{j1} \\ V_{j2} \\ \vdots \\ V_{jn} \end{bmatrix} = \lambda_{j1}^{-1} \begin{bmatrix} L_{11}T_{11} & L_{11}T_{12} & \cdots & L_{11}T_{1n} \\ L_{21}T_{11} & L_{21}T_{12} & \cdots & L_{21}T_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1}T_{11} & L_{n1}T_{12} & \cdots & L_{n1}T_{1n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{j1} \\ I_{j2} \\ \vdots \\ I_{jn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中矩阵对角线元素显示了节点在关键模式下的可激励性和可观测性的结合,不妨称之为关键模式下节点的“参与因子”,参与因子反映了节点对所发生谐振的参与度以及贡献度,对某种模式具有最大可观测性的节点同时也具有最大可激励性。具有最大参与因子的节点则可被认为是系统谐波谐振的中心。

3 风电场并网谐振现象模态分析

3.1 模态分析法应用算例

为验证模态分析法分析谐振现象的准确性,以图 5 所示三节点测试系统为例简要说明。各元件参数(标么值)标示于图中,三节点均可被激励或观察谐波谐振。图 6 为三节点测试系统的模态分析结果。由图 6 可知,测试系统共有 3 个准谐振点,分别为 145 Hz、335 Hz 和 775 Hz 处。

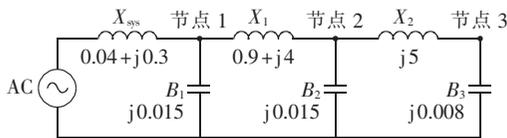


图 5 测试系统
Fig.5 Test system

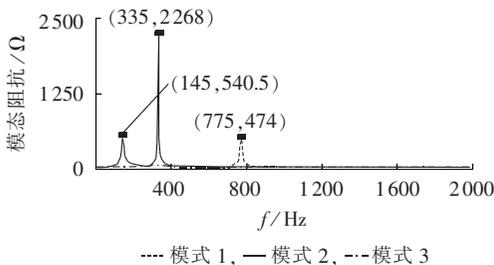


图 6 测试系统模态分析结果

Fig.6 Results of modal analysis for test system

图 7 为采用传统频率扫描法对各节点的分析结果,分别为从节点 1、2、3 看进去的等效输出阻抗的频率扫描特性。图 7 中第一图显示系统准谐振点为 775 Hz;图 7 中第二、三图显示系统在 145 Hz 和 335 Hz 均可能发生谐波谐振。对比图 6 与图 7 可知,两者所得谐振点一致,证明了模态分析法在分析谐振

现象时的可行性和准确性。同时,模态分析法中,对每个特定的谐振频率,只有一个谐振模式与之对应,由此可进一步计算各节点的谐振参与因子,从而得到更多的谐振相关信息。

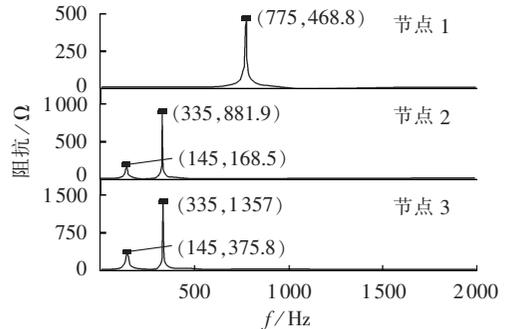


图 7 测试系统频率扫描结果

Fig.7 Results of frequency scan for test system

3.2 基于模态分析法的风电场并网谐振分析

建立多逆变器并网模型如图 8 所示。图中, $Z_g(s)$ 为电网等效阻抗; $Z_{lk}(s)$ 、 $Z_{ok}(s)$ 和 $G_k i_{refk}(s)$ 分别为线路阻抗、逆变器并网等效输出阻抗和诺顿等效电路受控电流源, $k=1, 2, \dots, n-1$ 。

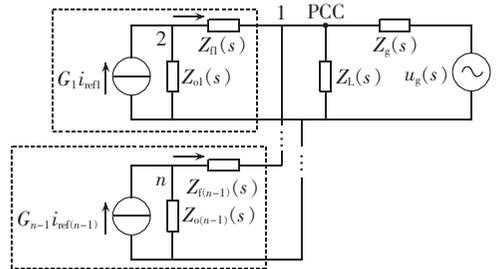


图 8 逆变器并网模态分析模型
Fig.8 Modal analysis model of grid-connected inverter

采用模态分析法研究并网谐振现象的具体步骤如下。

a. 由图 8 所示模态分析模型,可求得系统节点导纳矩阵 $Y(s)$ 。因节点导纳矩阵本身具有对称性,为简化表达式,仅列出其上三角元素,即:

$$\begin{cases} Y_{11}(s) = \frac{1}{Z_g(s)} + \frac{1}{Z_{l1}(s)} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{Z_{lk}(s)} \\ Y_{lk}(s) = -\frac{1}{Z_{lk}(s)} \quad k=2, 3, \dots, n-1 \\ Y_{kk}(s) = \frac{1}{Z_{lk}(s)} + \frac{1}{Z_{ok}(s)} \quad k=2, 3, \dots, n-1 \end{cases} \quad (9)$$

b. 对式(9)所示的节点导纳矩阵 $Y(s)$ 进行特征值分解,即 $Y(s)=L(s)A(s)T(s)$,从而得到左、右特征向量矩阵 $L(s)$ 、 $T(s)$ 及对角特征值矩阵 $A(s)$ 。

c. 分别用 $L(s)$ 、 $T(s)$ 表示模态电压和模态电流向量,即有 $U(s)=T(s)V(s)$ 、 $J(s)=T(s)I(s)$ 。同时,计算系统频率为 f 时各模式下的模态阻抗值。

d. 重复步骤 b、c 直至遍历所有可能引起系统谐振的谐波频率,从而得到各谐波频率下的系统模态阻抗曲线图,进而分析风电场并网谐振现象。

e. 模态阻抗值最大的点即为关键谐振峰值点,根据式(8)将其所对应的左、右特征向量依次取对应角线元素,求积可得各节点关键模式下的参与因子,并根据参与因子值的大小判断系统谐振中心。

4 实例分析

4.1 实例介绍

为检验模态分析法分析风电场并网谐振现象的可行性,以某风电场为实例进行仿真验证,其主接线图如图 9 所示。风电场装机容量为 99 MW,风电机组型号为华锐 SL1500,机组类型为水平轴异步风力发电机,单机容量为 1.5 MW。风电场分为两期建设,每期均安装有 33 台风电机组。为便于后文通过节点导纳矩阵实现并网谐振的模态分析,对实例系统进行节点序号的标注,将可能存在同类型谐波电流激励源的节点进行并联处理,共选取 9 个节点,其中,节点 1—3 与节点 5—7 为实际风电机组集电线联接处,每条集电线节点均联接有 11 台风机。风电机组出口电压为 690 V,经箱式变压器升压至 35 kV 后,再通过主变变换至 110 kV 由单回架空线并网。并网系统其他参数如表 1 所示。

4.2 模态分析结果

根据表 1 所示实例系统并网参数,基于 PSCAD 平台并采用平台中的变压器、输电线路等模块搭建仿真模型,风电场并网谐振的模态分析结果如图 10 所示(h 为谐振次数,模态阻抗为标么值;后同)。分析运算中各并网参数均采用标么值,并与 MATLAB 编程相结合,节点选取则以图 9 所标注的 9 个系统节点为准。为便于后文分析,假设此并网风电场为满出力运行状态。

由图 10 可知,并网系统可能在 3 种模式下发生谐波谐振现象,准谐振点及其对应的谐振模态阻抗

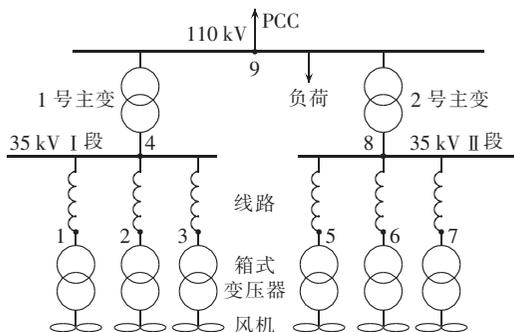


图 9 实例系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of a power system

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数类别	参数取值
系统	并网电压为 110 kV,最小短路容量为 639 MV·A。
箱式变压器	690 V/35 kV,额定容量为 1.6 MV·A,短路阻抗百分比为 6.5%。
1 号、2 号主变	35 kV/110 kV,额定电压为 (115±8×1.25%/36.75)kV,额定容量为 50 MV·A,联结组别为 YN-d11,短路阻抗百分比为 10.5%。
线路与负荷	架空线路型号为 LGJ400,长度为 10 km,每 km 电阻为 0.08 Ω,电抗为 0.397 Ω;负荷参数为 $P_L=62$ MW, $Q_L=28.2$ Mvar。
无功补偿装置	连接于 35 kV 母线侧,装置类型为静止无功发生器+固定电容器(SVG+FC),SVG 与 FC 的额定容量均为 6 Mvar。
逆变器及 LCL 滤波器	逆变器型号为 PM3000W,交流侧额定电压为 690 V;逆变器侧电感为 0.025 mH,额定电流为 500 A;电网侧电感为 0.4 mH,额定电流为 205 A;滤波电容为 33.4 μF,额定电压为 1.075 kV。

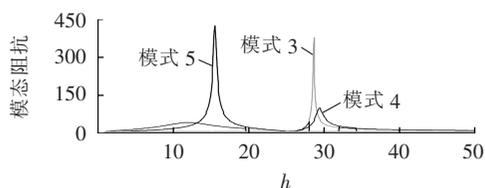


图 10 模态分析结果

Fig.10 Results of modal analysis

值分别为模式 3(27.2,378.9)、模式 4(29.1,95.6)和模式 5(15.3,425.7)。表 2 详细给出了在 3 种关键谐振模式下各节点的谐振参与因子值。

表 2 关键模式参与因子表

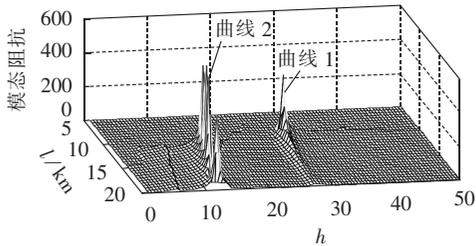
Table 2 Participation factors for key modes

节点	参与因子值		
	模式 3	模式 4	模式 5
1	0.1312	0.1300	0.0188
2	0.1214	0.1221	0.0198
3	0.1198	0.1207	0.0200
4	0.1174	0.1272	0.0183
5	0.1312	0.1300	0.0188
6	0.1214	0.1221	0.0198
7	0.1198	0.1207	0.0200
8	0.1174	0.1272	0.0183
9	0.0204	0.0002	0.8464

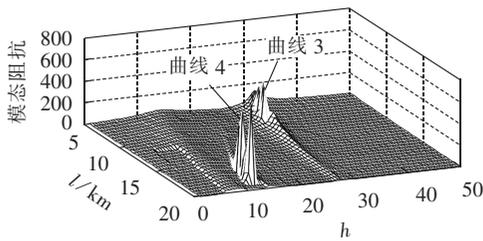
由表 2 可知,因搭建仿真模型时,35 kV 母线 I、II 段呈完全对称状态,故 3 种谐振频率下节点 1、2、3、4 与节点 5、6、7、8 的谐振参与因子值对应相等。且此 8 个节点的参与因子值相差不多,即发生谐振时,8 个节点将会受到同等程度的影响。节点 9 在谐振模式 5 下具有最大的参与因子值,则可将其作为此模式下的谐振中心。而在谐振模式 3 和模式 4 下,节点 9 均具有最小的参与因子值,可认为此时节点 9 相较于其他节点最不易观测到谐振现象,同时在节点 9 也最不易被激励起谐波谐振。

4.3 动态条件下的风电场并网谐振分析

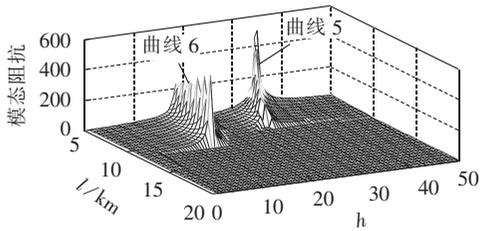
集电线作为风电机组与电力系统的联络线,其线路距离的长短对并网谐振现象存在着不可忽略的影响。继续以上述 3 种关键谐振模式为例,分析当集电线路长度由 5 km 渐增至 20 km 时风电场并网谐振变化情况,如图 11 所示(l 为集电线长度)。



(a) 谐振模式 3 变化趋势



(b) 谐振模式 4 变化趋势



(c) 谐振模式 5 变化趋势

图 11 集电线长度改变时的模态分析结果

Fig.11 Results of modal analysis vs. tieline length

由图 11 可知,模式谐振与节点谐振没有直接的对应关系,某一模式谐振可能包含有较多的参与节点。图 11(a)显示,当集电线长度在 8.2~14.7 km 时,谐振曲线 1 出现,所对应的谐振次数 h 由 29.4 变为 26.7,谐振幅值也随之骤减;当集电线长度在 11.5~20 km 时,谐振曲线 2 出现,所对应的谐振次数 h 由 15.8 减至 11.3。图 11(b)显示,随着集电线长度由 5 km 增至 11 km,曲线 3 所对应谐振次数 h 恒为 29.1;当集电线长度增至 15 km 时,谐振曲线 4 出现,所对应谐振次数 h 为 11,谐振幅值呈现波动性变化。图 11(c)显示,谐振曲线 5 和曲线 6 分别在集电线长度为 8.9 km 和 11.2 km 处谐振幅值减至零,即在此处谐波谐振现象将会消失。

一般而言,风机的运行与否和所处地带风速的大小有很大关系,当风速在 3~25 m/s 时,风机进入正常运行状态。以集电线 1 为例,考虑并非所有风机都正常并网运行,即集电线所接风机台数小于 11 台时的情况,其并网谐振频率以及各节点谐振参与因子如表 3 所示。

由表 3 可知,随着集电线 1 所联结风机台数的增加,谐振模式 5 和模式 3 所对应谐振次数逐渐减小。谐振模式 5 下,节点 9 的参与因子值始终保持最大,即恒为谐振中心,在此处最易被激励起谐振也最易观测到谐振现象。而在关键模式 3 下,节点 1—8 的参与因子值相差无几且都远大于节点 9,即发生谐波谐振时,节点 1—8 均受影响严重。参与因子值同时也反映出谐波谐振的传播距离。

通过比较可发现,在集电线路长度和并网风机台数改变的情况下,风电场并网谐振次数和和谐振幅值都在动态变化着。而节点参与因子、谐振中心等信息的提取可为风电场治理、谐振抑制提供一定的理论指导。

表 3 并网风机台数改变时的参与因子表

Table 3 Participation factors for different grid-connected generator quantities

风机台数	关键模式	h	参与因子值								
			节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9
3	5	18.1	0.0056	0.0057	0.0058	0.0024	0.0056	0.0057	0.0058	0.0024	0.9611
	3	31.3	0.1228	0.1183	0.1164	0.1248	0.1228	0.1183	0.1164	0.1248	0.0353
5	5	17.3	0.0057	0.0058	0.0059	0.0024	0.0057	0.0058	0.0059	0.0024	0.9602
	3	30.7	0.1230	0.1181	0.1161	0.1247	0.1230	0.1181	0.1161	0.1247	0.0362
7	5	16.8	0.0058	0.0059	0.0059	0.0025	0.0058	0.0059	0.0059	0.0025	0.9597
	3	29.8	0.1234	0.1178	0.1154	0.1245	0.1234	0.1178	0.1154	0.1245	0.0378
9	5	16.1	0.0059	0.0060	0.0060	0.0025	0.0059	0.0060	0.0060	0.0025	0.9590
	3	28.5	0.1244	0.1168	0.1137	0.1245	0.1244	0.1168	0.1137	0.1245	0.0411
	4	29.7	0.1292	0.1231	0.1205	0.1270	0.1292	0.1231	0.1205	0.1270	0.0002

5 结论

针对大规模风电场并网时易发生的谐波谐振问题,本文建立并网逆变器等效输出阻抗模型和电网等效模型,并基于此采用模态分析法进行谐振研究,

得出以下结论:

- a. 相比于传统的频率扫描法,模态分析法不仅能准确判定并网系统谐振次数,还可给出各节点谐振参与因子、谐振中心等谐振信息;
- b. 集电线长度以及并网风机台数的改变都将

很大程度地改变风电场并网谐振的谐振次数、谐振幅值以及谐振中心的位置;

c. 实例仿真验证了本文所用模态分析法的可行性, 所得结论可为工程实际中抑制谐波谐振、评估风电场电能质量等方面提供理论指导。

参考文献:

- [1] MOHAMED Y A R. Mitigation of converter-grid resonance, grid-induced distortion, and parametric instabilities in converter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):983-996.
- [2] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 含大规模风电的电网 AVC 研究与应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):81-86.
YU Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. AVC research and application for grid with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):81-86.
- [3] 潘伟, 李勇, 曹一家, 等. 用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5):94-99.
PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):94-99.
- [4] 许斌, 张志强, 李程昊, 等. 应用于双馈风力发电机的 LCL 型滤波器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5):44-50.
XU Bin, ZHANG Zhiqiang, LI Chenghao, et al. LCL filters applied in doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):44-50.
- [5] JALILI K, BERNET S. Design of LCL filters of active-front-end two level voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5):1674-1689.
- [6] WANG F, DUARTE J, HENDRIX M, et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):786-797.
- [7] HE J. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):234-246.
- [8] 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.
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):9-16.
- [9] 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.
ZHOU Lin, ZHANG Mi. Analysis of resonance phenomenon in large-scale photovoltaic power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):8-14.
- [10] 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.
- [11] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20):21-28.
ZHANG Min, HE Zhengyou, GAO Shibin. Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20):21-28.
- [12] 胡海涛, 何正友, 钱澄浩, 等. 基于模态分析的全并联 AT 网动态谐波谐振研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11):163-169.
HU Haitao, HE Zhengyou, QIAN Chenghao, et al. Modal analysis based research on dynamic harmonic resonance of all-parallel autotransformer traction supply network[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):163-169.
- [13] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22):89-93.
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22):89-93.
- [14] HUANG Z, CUI Y, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2):222-231.
- [15] CUI Y, XU W. Harmonic resonance mode analysis using real symmetrical nodal matrices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3):1989-1990.
- [16] 郑昕昕, 肖岚, 王长宝, 等. 三相变流器 LCL 滤波器参数优化新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12):55-63.
ZHENG Xinxin, XIAO Lan, WANG Changbao, et al. A new parameter optimization method of LCL filters in three-phase converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12):55-63.
- [17] 许德志, 汪飞, 阮毅. LCL、LLCL 和 LLCL 滤波器无源阻尼分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18):4725-4735.
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi. Passive damping of LCL, LLCL and LLCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18):4725-4735.
- [18] 胡伟, 孙建军, 马谦, 等. 多个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.
- [19] 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.
- [20] 郑旭, 裴志宏, 孙海顺, 等. 可控串补装置研制及阻抗特性研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5):50-53.
ZHENG Xu, PEI Zhihong, SUN Haishun, et al. Design and implement of dynamic simulation system of TCSC and study on resistance characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5):50-53.
- [21] 杨勇, 赵春江. 分布式发电系统中并网逆变器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11):51-55.
YANG Yong, ZHAO Chunjiang. Proportional resonance controller of grid-connected inverter for distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):51-55.

作者简介:



唐振东

唐振东(1993—),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事逆变器并网与电能质量控制技术研究(E-mail:tzdinscu@126.com);

杨洪耕(1949—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,从事电能质量及其控制技术的教学和研究工作。

(下转第 99 页 continued on page 99)

刘春明(1972—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为电网磁暴灾害分析与控制(E-mail:cm_liu@163.com);
冯士伟(1992—),男,河南林州人,硕士研究生,主要研

究方向为电力系统分析与控制(E-mail:fengshiwei2015@163.com);

郑许朋(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:xp_zheng123@163.com)。

Multi-objective optimization strategy based on PSO algorithm for GIC-Q of power grid

YANG Peihong^{1,2}, LIU Lianguang¹, LIU Chunming¹, FENG Shiwei², ZHENG Xupeng²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: GIC(Geomagnetically Induced Current) may cause the DC magnetic bias when it flows through the transformer windings, resulting in the increase of transformer reactive-power loss, the imbalance of grid reactive-power and the impact on safe and stable grid operation. A multi-objective reactive-power optimization strategy based on the particle swarm optimization algorithm is proposed to restrain the influence of GIC and ensure the reactive-power balance of power grid under geomagnetic disturbance, which takes the minimum cost of reactive-power compensation equipments and the minimum voltage deviation as its objectives. The proposed strategy applies the niche sharing mechanism to update the particle locations and archives the Pareto optimal solution set according to the crowding distance for the diversity and uniformity of solutions. Chaotic mutation is introduced to avoid the locally optimal solutions and to improve the global searching ability. Simulative results of GIC-benchmark verify the accuracy and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: geomagnetic disturbance; geomagnetically induced current; reactive power optimization; voltage deviation; multi-objective optimization; niche; particle swarm optimization algorithm; chaotic mutation; Pareto optimality

(上接第 92 页 continued from page 92)

Harmonic resonance research based on modal analysis for grid-connected wind farms

TANG Zhendong, YANG Honggeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the harmonic resonance easily occurred during the grid-connection of wind farm, the modal analysis is applied to decouple the nodal admittance matrix of grid-connected system and the eigenvalue decomposition is adopted to determine the related information, such as resonant frequency, resonant centre, etc. The equivalent Norton model of grid-connected LCL inverter and the equivalent grid model are established, based on which, the resonance phenomenon of grid-connected wind farm is researched by the modal analysis and the resonant information of each node is determined, such as resonant participation factor, resonant center, etc. A simulation model based on PSCAD is built for an actual 99 MW wind farm and the variation laws of nodal resonant participation factor and resonant center versus the tieline length and the grid-connected generator quantity are studied, verifying the feasibility of the modal analysis applied.

Key words: wind farms; grid-connected inverter; harmonic resonance; modal analysis; participation factor