

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.028

基于PMU数据频谱辨识次同步振荡的研究

李自明^{1,2,3}, 姚秀萍⁴, 王海云^{1,2}, 王维庆^{1,2}, 常喜强⁴, 郭小龙⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆大学教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830047; 3. 国网浙江桐乡市供电公司, 浙江 桐乡 314500; 4. 新疆电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830001)

摘要:为解决风电场与电网间发生的次同步振荡现象,保证风电场与电网的稳定运行,经研究发现,利用现有的同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)监测次同步谐波是解决次同步振荡问题的有效途径。文中以新疆哈密某风电场为例,首先通过PMU记录的电流幅值数据频谱分析次同步振荡产生的主要频段,接着对次同步谐波分量产生机理进行分析以及锁相环节进行仿真验证。结果表明,PMU数据频谱分析得出的振荡频段与锁相环节仿真验证结果相吻合,从而验证了该方法的有效性。该研究结果可为风电场次同步振荡的理论研究和工程实际提供参考依据。

关键词:同步相量测量装置;次同步振荡;电流幅值;数据频谱分析;锁相环

Study of Identifying Sub-synchronous Oscillation Based on PMU Data Spectrum

LI Ziming^{1,2,3}, YAO Xiuping⁴, WANG Haiyun^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2},
CHANG Xiqiang⁴, GUO Xiaolong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 3. Power Supply Bureau of Tongxiang, Zhejiang Tongxiang 314500, China; 4. Xinjiang Electric Power Dispatching and Control Center, Urumqi 830001, China)

Abstract: For solving the phenomenon of sub-synchronous oscillation between the wind farm and power grid, and ensuring the stable operation of the wind farm and power grid, how to use the existing phasor measurement unit (PMU) to monitor the harmonic would be an effective way to solve the problem of the sub-synchronous oscillation. In this paper, taking a wind farm in Hami, Xinjiang for example, firstly, through recording the frequency spectrum data of the current amplitude from PMU is used to analyze the main frequency band of the sub synchronous oscillation. Then the mechanism of sub-synchronous harmonic component is analyzed, and the phase locked-loop is simulated and verified. The results show that the frequency spectrum analysis of PMU data is consistent with the simulation results of phase locked-loop in oscillating frequency band, and finally verifies the effectiveness of this method. The study provides basis and reference for theoretical research and practical engineering on sub-synchronous oscillation for wind farm.

Key words: phasor measurement unit(PMU); sub-synchronous oscillation; current amplitude; data spectrum analysis; phase locked-loop

0 引言

中国目前是风电装机最多的国家,具有丰富的

风资源开发潜力,尤其是三北地区,年平均风速均在6 m/s以上,风电有望成为未来主流能源的基础。随着风电技术的成熟,风电机组将从十二五规划中主流单机容量1.5~2.5 MW向十三五规划中的5 MW

收稿日期:2017-10-11; 修回日期:2017-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51667020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51667020).

以上风电机组发展。更大容量及更高发电效率的风电机组纷纷被推向市场,并逐渐取代单机小容量的产品,已成为电力市场发展的必然^[1-3]。风电的集中并网,以及风电本身的随机性与波动性^[4-5],加之源荷分离,原本较弱的网架变得不堪重负,使得次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)或次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)现象^[6-8]在近几年电网中经常发生。这种 SSR/SSO 对电网冲击较大,严重威胁电力系统安全可靠运行。

最早对 SSR/SSO 的研究主要集中在火电厂与电网的相互作用,但新能源中风电规模化发展,使得风电场与电网间发生的 SSR/SSO 现象频繁出现,尤以 2009 年美国 Texas 风电场次同步振荡事件和 2015 年 7 月 1 日中国新疆哈密地区的大型风电场出现次同步频率范围的持续功率振荡事件较为突出。文[9-10]以直驱风机风电场为例,分析了接入交流电网强弱、风机出力、并网风机台数、风机控制参数及动态无功补偿设备对振荡特性的影响;文[11]以双馈风机风电场为例,提出了一种基于定子侧变流器的附加阻尼控制策略来抑制 SSO,但是对双馈风机串补系统发生 SSO 机理的研究有待进一步的深入;文[12-13]研究了整流站附近多台风机并列运行时的次同步阻尼控制器(sub-synchronous damping controller, SSDC)抑制机组 SSO 的设计方法,得出不论是何种机型,SSDC 输入信号中消去异模分量可抑制多台机组的 SSO。

但是目前对风电场 SSO 的研究,不论是 SSO 的振荡机理、特性分析方法,还是完全复现风电场系统故障、机组跳机都存在较多问题^[14-16]。目前对于 SSR 问题的分析,利用在线监测装置,通过同步相量测量单元装置(phasor measurement unit, PMU)记录的历史数据,以 MATLAB 作为仿真软件对 PMU 数据进行频谱分析,使得对 SSR 问题的分析研究更加明朗化。文中以新疆哈密某地区风电场为实例进行分析,通过 MATLAB 软件仿真平台对山北各出线 PMU 量测的 A 相电流幅值进行了频谱分析,找出 8 min 内该线路 SSO 幅值最大点,记录该时间段对应的幅值和频率。然后,对 SSR 分量产生机理及锁相环节进行仿真验证,以对 PMU 数据分析结果给出初步解释。通过频谱分析可以将 SSO 时的谐波频段精确到某一区间,从而为以后系统监测 SSO 提供有力的依据。

1 PMU 装置及采集数据情况

目前能够对电网中的低频振荡扰动以及其他扰动进行连续监测的装置主要是 PMU,其在重要的

变电站和发电厂均有安装,在电力系统监测、保护、控制等诸多方面均有应用,已成为电力系统动态过程监测、分析与控制的基础^[17-19]。PMU 装置录波包括暂态录波和动态录波,暂态录波采样频率为 1 200 Hz 以上,为正序、负序、零序越限等异常情况触发录波,录波时长通常较短只有几秒钟,无法用于分析次同步谐波;动态录波为每分钟自动持续录波,便于分析电网持续振荡过程,采样频率为 100 Hz,录波时长 60 s。故现行 PMU 典型录波装置为动态录波,其结构图见图 1。

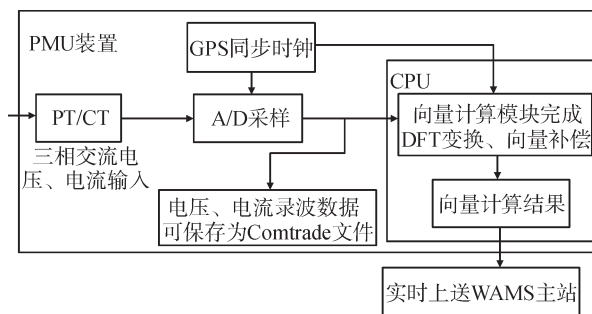


图1 PMU装置典型的结构图

Fig. 1 Typical structure of PMU device

由图1可知,现有的PMU装置测量输出的向量结果是根据A/D采样的录波数据计算得出的。国内主流PMU装置目前均采用定间隔采样,采样数据以离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)^[20]为核心算法来计算向量的幅值和相角。根据现有PMU装置的测量原理可知,PMU测量出三相电压、电流向量是根据三相电压、电流录波数据计算出来的,其主要功能是在全网统一时钟所触发的采样中对厂站端的关键电气信息进行测量、相量计算以及实时上送到后台广域监测系统(wide area measurement system, WAMS)主站系统。

2 PMU数据频谱分析

哈密地区网架结构薄弱,短路容量较小,动态无功支撑能力严重不足,动态无功补偿装置性能差异大,风电接入较多,仅2015年无规律的出现过30多次SSO情况。其中2015年下半年8月25日23时左右以及9月3日1时48分左右发生的振荡较为明显。这对电力系统稳定运行造成较大影响,引发了对风电、光伏、火电及直流并存方式下电网安全稳定运行的担忧。

目前哈密地区已投产多座风电场,主要分布于烟墩地区、十三间房地区以及山北地区,其中山北地区网架结构较为薄弱,送出网架相对滞后。该地区电网主要网架见图2。

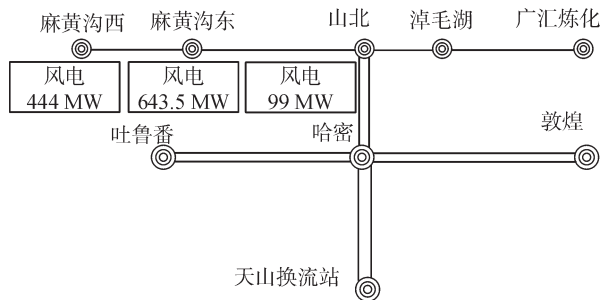


图2 山北地区电网网架图

Fig. 2 The power grid structure of Shan Bei area

据统计,PMU覆盖了哈密地区220 kV及以上变电站,220 kV风电汇集站以及部分110 kV和35 kV风电场,覆盖范围较广,这为利用PMU数据对SSR分量进行分析提供了可能性。

因此,对该地区2015年8月25日和2015年9月3日的PMU数据进行了频谱分析。为分析方便,消除了PMU电流量测量幅值中的基频分量,仅分析5~50 Hz范围内的振荡分量的频率与幅值,其中PMU的上传频率都为100 Hz。

2.1 8月25日PMU数据频谱分析

2.1.1 哈密地区山北变PMU频谱分析结果

经分析表明,2015年8月25日哈密地区电网中含有较高SSO分量的时间段为22时58分00秒至23时06分00秒(共8 min)。因此,对山北各出线PMU量测的A相电流幅值进行了频谱分析。分析方法为,对各出线的PMU数据以10 s时间单位进行频谱分析,找出8 min内该线路SSO幅值最大点,记录该时间段对应的幅值和频率,分析见表1(山北变22时58分00秒至23时06分00秒)。

表1 山北变谐波频谱分析

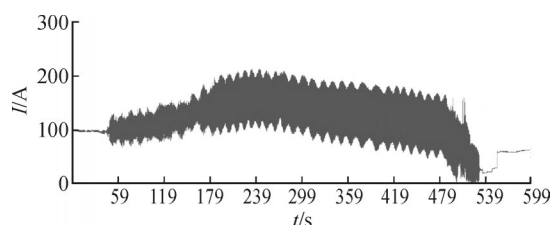
Table 1 Harmonic spectrum analysis of Shan Bei substation

参数	哈山一线	哈山二线	山黄线	山淖线
幅值/A	34.7	35.8	52.2	8.5
频率/H	28.9	28.9	28.9	28.9
占基频百分比/%	27.8	57.9	57.9	4.3
参数	1号主变 高压侧	1号主变 中压侧	2号主变 高压侧	2号主变 中压侧
幅值/A	0.7	1.8	0.9	1.4
频率/H	29.9	29.0	29.5	29.5
占基频百分比/%	5.9	3.2	6.2	4.5

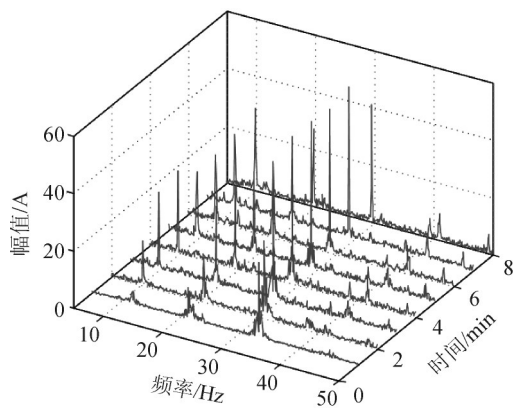
由表1可以看出,220 kV山黄线存在较大的SSR分量,其振荡频率集中在28.9 Hz,该谐波分量占基频的57.97%。下面对黄麻线和山黄线8月25日22时58分00秒至23时05分59秒PMU数据进行详细分析。

2.1.2 山北变山黄线PMU数据频谱分析

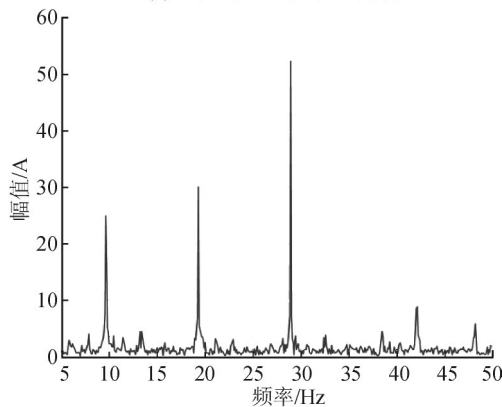
山北变山黄线A相电流PMU测量幅值见图3(a)(从22:57:00开始),对PMU数据进行频谱分析,以10 s时间单位进行频谱分析,找出每分钟该线路SSO幅值最大时段,画出频谱图见图3(b),分析图像可以看出,山北变PMU输出山黄线A相电流幅值不仅存在很大的28.9 Hz的谐波分量,还存在较大的其他频率分量。对振荡幅值最大的10 s数据进行分析,得到结果见图3(c)。



(a) PMU输出山黄线A相电流幅值



(b) 山黄线PMU数据频谱分析



(c) 振荡最大时段山黄线频谱分析

图3 山北变山黄线PMU数据频谱分析
for Shan Bei substation

从图3可以看出,除28.9 Hz之外,还有9.6、19.3、38.5、42.2、48.3 Hz振幅较大的谐波分量。其中9.6 Hz振幅为24.81 A,占基频的27.49%;19.3 Hz振幅为29.86 A,占基频33.19%;38.5 Hz振幅为4.357 A,占基频4.84%;42.2 Hz振幅为8.75 A,占基频9.73%;

48.3 Hz 振幅 5.70 A, 占基频 6.34%。

2.2 9月3日PMU数据频谱分析

2.2.1 哈密地区山北变PMU频谱分析结果

经分析表明,2015年9月3日哈密地区电网中含有较高SSO分量的时间段为1时48分40秒至1时49分40秒(共1 min)。因此,对山北各出线PMU量测的A相电流幅值进行了频谱分析。分析方法为,对各出线的PMU数据以10 s时间单位进行频谱分析,找出1 min内该线路SSO幅值最大点,记录该点对应的幅值和频率,分析见表2(山北变1时48分40秒至1时49分40秒)。

表2 山北变谐波频谱分析

Table 2 Harmonic spectrum analysis of Shan Bei substation

参数	哈山一线	哈山二线	山黄线	山淖线
幅值/A	8.8	9.2	20.6	0.9
频率/H	30.7	30.7	30.7	30.7
占基频百分比/%	27.8	22.1	31.9	4.4

参数	1号主变 高压侧	1号主变 中压侧	2号主变 高压侧	2号主变 中压侧
幅值/A	1.2	1.2	1.4	2.6
频率/H	30.7	30.7	30.7	30.7
占基频百分比/%	4.4	1.2	4.9	4.7

由上述结果可以看出,220 kV 黄麻线、山黄线存在较大的谐波分量,谐波分量集中在30.7 Hz,该谐波分量占基频的31.92%。下面对山黄线9月3日1时48分40秒至1时49分40秒PMU数据进行详细分析。

2.2.2 山北变山黄线PMU数据频谱分析

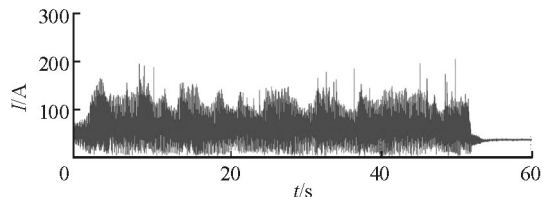
山北变山黄线A相电流PMU测量幅值见图4(a)(从01:48:39开始),对上述PMU数据进行频谱分析,以10 s时间单位进行频谱分析,画出频谱图见图4(b),从上述分析图像中可以看出,山北变PMU输出山黄线A相电流幅值不仅存在30.7 Hz的谐波分量,还存在较大的其他频率分量。对振荡幅值最大的10 s数据进行分析,得到结果见图4(c)。

从图4可以看出,除30.7 Hz之外,还有10.2、20.5、38.6、48.9 Hz振幅较大的谐波分量。其中10.2 Hz振幅为9.01 A,占基频的13.94%;20.5 Hz振幅为11.11 A,占基频17.20%;38.6 Hz振幅为5.48 A,占基频8.49%;48.9 Hz振幅为3.17 A,占基频4.91%。

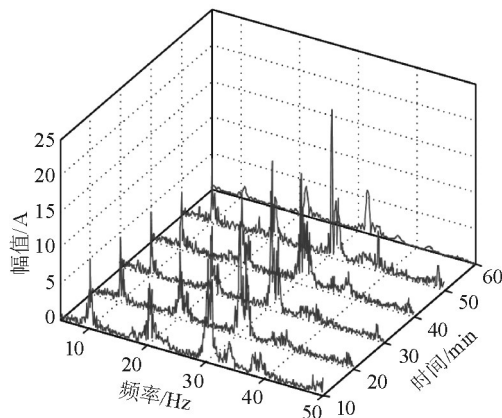
3 次同步谐波分量产生机理及锁相环节的仿真验证

3.1 次同步谐波分量产生机理

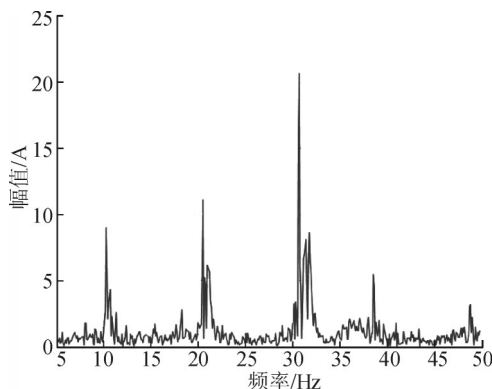
下面分析d/q轴控制系统下,SSR分量产生规律。分析中,网侧变流器、锁相环参数均采用山北



(a) PMU输出山黄线A相电流幅值



(b) 山黄线PMU数据频谱分析



(c) 振荡最大时段山黄线频谱分析

图4 山北变山黄线PMU数据频谱分析

Fig. 4 PMU data spectrum analysis of Shan-Huang line for Shan Bei substation

变实际系统参数。d/q轴控制系统见图5。

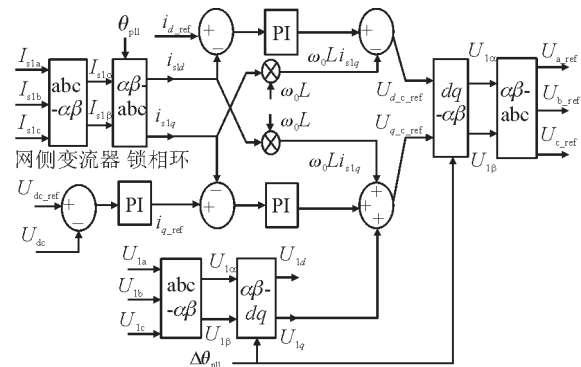


图5 d/q轴控制系统

Fig. 5 d/q axis control system

图5中d/q轴控制系统的输入为网侧变流器交流电压 U_1 和线路电流 I_{s1} ,其中 I_{s1} 的d/q轴分量分别为 I_{s1d} 、 I_{s1q} ,直流电压参考值及测量值分别为 U_{dc-ref} 、

U_{dc} , 输出为网侧三相电压参考值 $U_{abc-ref}$ 。

针对 d/q 轴控制系统中, 网侧变流器其输入为稳态工频电流分量 $I_{s1} \cos(\omega_0 t + \varphi_{s1})$ 和交流电压稳态工频电压分量 $U_{s1} \cos(\omega_0 t + \varphi_{U1})$, 并且网侧变流器交流电压及线路电流中叠加了频率为 f_2 的次同步频率分量。当锁相环输入中叠加 f_2 次同步频率分量时, 电压 d 轴分量及锁相环输出相位角中会含有 f_0-f_2 及 $2(f_0-f_2)$ 分量,

$$\begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll}) & \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll} - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll} + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll}) & -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll} - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll} + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + U_{1s} \cos(\omega_2 t + \varphi_{1s}) \\ U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi) + U_{1s} \cos(\omega_2 t + \varphi_{1s} - \frac{2}{3}\pi) \\ U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi) + U_{1s} \cos(\omega_2 t + \varphi_{1s} + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta\theta_{pll} = \int \left[\omega_0 + \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) U_{1d} \right] dt =$$

$$A_{m1} U_{1s} \cos[(\omega_0 - \omega_2)t + \varphi_{U1s} + \varphi_{m1}]$$

式(2)中: A_{m1} 为锁相环输出相位角幅值相对于电压 d 轴分量的放大倍数; φ_{m1} 为锁相环输出相位角相位超前电压 d 轴分量的相位; K_p 、 K_I 分别为锁相环 PI 控制器的比例系数及积分系数。 d/q -abc 反变换

$$\begin{cases} U_{d.c} = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) (I_{d.ref} - I_{s1d}) - \omega_0 L_1 I_{s1q} \\ U_{q.c} = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \left[\left(K_{pq1} + \frac{K_{iq1}}{s} \right) (U_{dc.ref} - U_{dc}) - I_{s1q} \right] + \omega_0 L_1 I_{s1d} + U_{1q} \end{cases}$$

在 d/q -abc 正反变换过程中, d/q 轴中稳态量, f_0-f_2 , $2(f_0-f_2)$ 分量以及锁相环输出相位角中稳态量相互作用, 使三相电压参考值中包含多频率分量。在注入频率为 f_2 的次同步谐波时, 三相参考电压中含有幅值较大的 f_2 , $2f_0-f_2$ 分量, 以及幅值较小的 f_0-2f_2 , $3f_0-2f_2$, $2f_0-3f_2$, $4f_0-3f_2$, $3f_0-4f_2$, $5f_0-4f_2$ 分量。

其中频率为 f_2 的 SSR 和频率为 $2f_0-f_2$ 的超同步谐波幅值较大, 它们是由 d/q 坐标系中频率为 f_0-f_2 的 SSR 变换得到的; 频率为 f_0-2f_2 , $3f_0-2f_2$, $2f_0-3f_2$ 和 $4f_0-3f_2$ 的分量幅值较小, 它们是由 d/q 坐标系反变换到 abc 坐标系时 d/q 轴控制系统中频率为 f_0-f_2 和 $2(f_0-f_2)$ 的分量与锁相环中频率为 f_0-f_2 和 $2(f_0-f_2)$ 的分量多次作用得到的。

3.2 锁相环节的仿真验证

在 1 kV 的工频分量上叠加幅值为 0.1 kV, 频率为 30 Hz 的次同步频率分量时, 锁相环输出相位角及三相电压 d 轴分量见图 6。

当叠加 30 Hz 次同步频率分量时, 根据机组模态频率与系统侧频率互补的原则, 系统侧对应的特征频率为: $50-30=20$ Hz, 这与图 6 锁相环输出相位角及 d 轴电压分量中含有幅值较大 20 Hz 次同步频

abc- d/q 比例积分电压分量的数学模型见式(1)。

不考虑锁相环输出相位角的摄动, 当注入频率 f_2 的次同步频率分量, 电压 d 轴分量会含有 (f_0-f_2) 频率分量, 进而锁相环输出相位角中会含有 (f_0-f_2) 频率分量。

针对 (f_0-f_2) 频率分量, 给出其开环传递函数表达式见式(2)。

过程中输出为

$$\begin{bmatrix} U_{a.ref} \\ U_{b.ref} \\ U_{c.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll}) & -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll}) \\ \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll} - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll} - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_{pll} + \varphi_{pll} + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta_{pll} + \varphi_{pll} + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d.c} \\ U_{q.c} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中,

率分量以及幅值较小的 40 Hz 频率分量相一致, 其中 20 Hz 分量幅值较大为 0.101 5 kV, 40 Hz 分量幅值较小为 0.001 064 kV。

4 结论

文中通过对 2015 年 8 月 25 日及 9 月 3 日哈密山北地区 220 kV 线路上 PMU 数据频谱进行了研究分析, 并进行了理论推导, 主要结论如下:

1) 文中通过 PMU 数据频谱分析得出山北地区电流出现的振荡分量主要集中在 28.9~30.7 Hz 和 19.3~20.5 Hz 两个频段内, 并由 SSR 分量产生机理初步分析了产生众多振荡频率分量的原因。

2) 锁相环节的仿真验证再现了 PMU 数据频谱记录的电流幅值曲线, 且振幅最大时的频率恰好落在频谱分析得出的频段内, 从而验证了分析结论的正确性。

参考文献:

- [1] 孙红霞, 赵彩宏. 光伏/风电并网测试装置的设计和开发[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 103-109.
SUN Hongxia, ZHAO Caihong. Design and development of

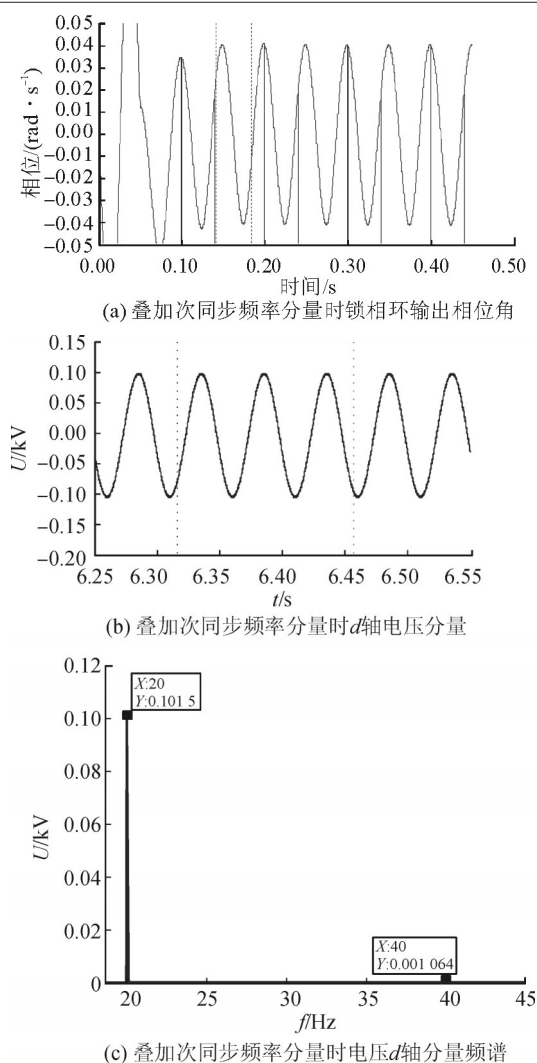


图6 锁相环节的仿真验证

Fig. 6 Simulation and verification of phase locked loop

- testing devices for photovoltaic/wind power grid connection[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 103-109.
- [2] GHOFrani M, ARABALI A, ETEZADI-AMOLI M. Modeling, analysis, and suppression of the impact of full-scale wind-power converters on subsynchronous damping[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego: [s.n.], 2012.
- [3] 郑翔宇, 艾斯卡尔, 董开松, 等. 中外风电规程关键技术要求研究及其探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 1-8. ZHENG Xiangyu, AI Sikaer, DONG Kaisong, et al. Studies and discussions on the key technical requirements of electricity network to the wind turbine generators in the world[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 1-8.
- [4] 袁铁江, 晁 勤, 李义岩, 等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27. YUAN Tiejiang, CHAO Qin, LI Yiyang, et al. Short-term wind power output forecasting model for economic dispatch of power system incorporating large-scale wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 23-27.

- [5] 高玉洁, 张永凯, 李蓉蓉, 等. 计及风电的电力系统检修备用容量评估及应用[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 31-38. GAO Yujie, ZHANG Yongkai, LI Rongrong, et al. Maintenance reserve capacity evaluation and its application considering wind power and maintenance demand uncertainty[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 31-38.
- [6] FAN L L, KAVASSERI R, MIAO Z X, et al. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [7] 张 鹏, 毕天姝, 杨奇逊, 等. 相近扭振频率并联发电机组次同步振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5181-5187. ZHANG Peng, BI Tianshu, YANG Qixun, et al. Research on subsynchronous oscillation of parallel connected generators with close torsional frequencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5181-5187.
- [8] FAIRBAIRN R E, JENNINGS G D, HARLEY R G. Turbo-generator torsional mechanical modal parameter-identification from online measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(4): 1389-1395.
- [9] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 1-7. XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 1-7.
- [10] 张 鹏, 毕天姝. HVDC引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 961-968. ZHANG Peng, BI Tianshu. Mechanism analysis of large disturbance risk of subsynchronous oscillation caused by HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 961-968.
- [11] 董晓亮, 谢小荣. 双馈风机定子侧变流器附加阻尼抑制次同步振荡方法研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 1-7. DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong. Study of SSR new mitigation scheme by stator side converter in DFIG[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 1-7.
- [12] 徐振宇, 李树鹏, 苏靖棋, 等. 基于遗传模拟退火算法的SEDC与SSDC控制参数的协调优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1983-1988. XU Zhenyu, LI Shupeng, SU Jingqi, et al. Genetic and simulated annealing algorithm based coordinated optimization of parameters of supplementary excitation damping controller with parameters of sub-synchronous oscillation damping controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1983-1988.
- [13] 王 坤, 徐 政, 杜 宁, 等. 并列机组轴系次同步振荡特性及采用SSDC抑制多机系统次同步振荡研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 321-329. WANG Kun, XU Zheng, DU Ning, et al. Research on shaft

- subsynchronous oscillation characteristic of parallel generators and SSDC application in mitigating SSO of multi-generator system[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(1): 321-329.
- [14] IEEE standard for synchrophasors for power systems: IEEE Standard C37.118.1—2011[S]. 2011.
- [15] BOOPATHI V P, AHAMED M R, DEVI K R. Analysis and mitigation of subsynchronous oscillations in a radially-connected wind farm[C]//2014 Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy. [S.l.]: IEEE, 2014: 1-7.
- [16] ZHANG Yingchen, MARKHAM P, XIA Tao, et al. Wide-area frequency monitoring network(FNET) architecture and applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 159-167.
- [17] HE M, NIMMAGADDA S, BAYNE S, et al. Subsynchronous oscillation detection using phasor measurements and synchrosqueezing transform[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-5.
- [18] DOMÍNGUEZ-GARCÍA J L, BAUDETTE M, DEL-ROSA-RIO G, et al. Validation experiment design of a PMU-based application for detection of sub-synchronous oscillations[C]//IEEE, International Conference on Environment and Electrical Engineering. [S.l.]: IEEE, 2015: 1898-1903.
- [19] CHEN C S, LIU C W, JIANG J A. A new adaptive PMU based protection scheme for transposed/untransposed parallel transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 395-404.
- [20] 岑炳成, 刘涤尘, 董飞飞, 等. 抑制次同步振荡的 SVC 非线性控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 129-135.
- CEN Bingcheng, LIU Dichen, DONG Feifei, et al. Nonlinear control method of static var compensator for damping subsynchronous oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 129-135.

李自明(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

姚秀萍(1961—), 女, 客座教授, 硕士生导师, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度运行、继电保护。

王海云(1973—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为可再生能源发电与并网技术。

王维庆(1959—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为风力机发电及风电并网技术。

常喜强(1976—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

郭小龙(1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统调度运行及分析。

(上接第 172 页)

grid corrosion detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2132-2138.

荆 晶(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

彭敏放(1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、工程电磁场数值计算与仿

真、配电网故障诊断等。

周 斌(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

刘 达(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

李小方(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。