

新能源电网频率-惯性响应时空分布特性研究

杨德友, 刘云鹏

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着电网中新能源渗透率的提高, 系统惯量降低改变了系统频率特性。因此, 在新能源机组并网的情况下, 对于频率惯性响应时空分布特性的研究显得尤为重要。针对这一问题, 提出了从区域的角度来研究新能源电网频率时空分布特性。从频率动态响应特性出发, 分析了频率时空分布特性的影响因素以及电力系统频率分区响应特性, 进而研究新能源并网下频率时空分布特性。以 10 机 39 节点系统为例进行仿真, 验证了上述理论分析的正确性和有效性, 为进一步探索电网频率时空分布特性提供了有利依据。

关键词: 新能源; 电力系统; 频率; 时空分布特性

Study on temporal and spatial distribution characteristics of frequency-inertia response of new energy grid

YANG Deyou, LIU Yunpeng

(School of Electrical Engineering Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: With the increase of new energy penetration in the power grid, the system inertia decreases, and the frequency characteristics of the system are changed. Therefore, the research on the time-space response of units is particularly important in the case of grid connection of new energy. To solve this problem, it is proposed to study the temporal and spatial distribution characteristics of the frequency of the new energy grid from the perspective of the region. Based on the frequency dynamic response characteristics, the influencing factors of frequency space-time distribution characteristics and the frequency zoning response characteristics of the power system are analyzed, and then the frequency space-time distribution characteristics under the grid connection of new energy are studied. Taking the 10 machines 39 bus system as an example, the correctness and effectiveness of the above theoretical analysis are verified, which provides a favorable basis for further exploring the temporal and spatial distribution characteristics of the power grid frequency.

Key words: new energy; power system; frequency; time and space distribution

0 引言

随着科学的进步, 可再生能源日益发展。当电网中新能源机组渗透率增加时, 随之而来的是部分同步机组被新能源机组所替代, 使得系统的惯量减小, 储存的动能减小, 导致系统的频率响应发生改变^[1]。在电力系统稳态运行时, 系统

频率由于发电机的额定转速运行状态而不发生变化。但是电力系统中一直都存在着各种干扰, 如负荷突变、切机等, 这将导致系统内能量不平衡。基于上述原因, 发电机的转速发生变化, 与转速呈耦合关系的频率也会发生变化^[2]。而对于惯量, 主要体现在对于频率变化的阻碍作用^[3]。

发电电动机输入的机械功率可以通过控制环节进行调节,使其保持恒定;但是电磁功率却不同,其影响因素有负荷类别、电网结构等^[4]。不难看出,影响因素具有不确定性,无法使其恒定,所以频率难免会发生变化。由于电网中各母线与扰动点之间的距离不同、网络的不均匀分布、各机组参数不同以及负荷特性差异等因素,使得电网中各点频率的变化有所不同,因此频率响应将在时间以及空间上呈现出明显的分布特征。因此,在高比例新能源场景下,对于频率特性的研究显得尤为重要。

文献[5]运用新能源机组并网的简化模型,结合频率变化曲线,对于电力系统稳定性以及频率概率分布进行了研究。文献[6]采用频率波以及经验正交函数方法对频率动态响应的时空特性、影响因素及形成机理等进行分析。但以上文献并没有考虑新能源电网频率时空分布特性。因此接下来在考虑新能源并网的情况下,对于频率、惯性响应时空分布特性进行了分析与仿真,对维持频率稳定及系统安全具有重大意义。

1 电力系统动态频率响应特性

1.1 同步机系统频率响应特性

电力系统发生扰动后,有功频率动态过程主要分为扰动功率分配、惯性响应和频率调节三个阶段。只考虑扰动功率分配和惯量响应阶段而不考虑后续的调速器动作以及自动发电控制等过程,即只考虑机电动态而不考虑控制系统的动作。假定出现扰动时,各处电压的幅值不变,只是相角发生改变。则各节点的注入有功功率 P_i 为

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m E_i E_j (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中, m 为发电机台数; δ_{ij} 为节点 i 处与节点 j 处的相角差; E_i 为第 i 台发电机的内电动势; B_{ij} 、 G_{ij} 为 i 、 j 两点间的转移电纳和电导。

当在节点 k 处产生负荷扰动量 ΔP_k 时,各节点的注入有功功率 P_i 为

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m E_i E_j (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) + \quad (2)$$

$$E_i U_k (B_{ik} \sin \delta_{ik} + G_{ik} \cos \delta_{ik})$$

由于节点 k 处的负荷扰动突然变化,导致 k 节点的电压相角由 δ_{k0} 变为 $(\delta_{k0} + \Delta \delta_k)$,但发电机节点内角度由于惯性的作用不会突变。

对式(2)进行线性化处理,得到

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, k}}^m (E_i E_j B_{ij} \cos \delta_{ij0}) \Delta \delta_{ij} + \\ &\quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, k}}^m (E_i U_k B_{ik} \cos \delta_{ik0}) \Delta \delta_{ik} \\ &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, k}}^m P_{sij} \Delta \delta_{ij} + P_{sik} \Delta \delta_{ik} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta P_k = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m (U_k E_j B_{kj} \cos \delta_{kj0}) \Delta \delta_{kj} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m P_{skj} \Delta \delta_{kj} \quad (4)$$

式中, δ_{ij0} 为稳态运行时 i 、 j 两点电压的相位差; P_{sij} 为整步功率系数。

当节点 k 处发生扰动时,系统不平衡功率由各机组分担,即

$$\Delta P = \left(\frac{P_{sik}}{\sum_{i=1}^m P_{sik}} \right) \Delta P_i \quad (5)$$

因此,电力系统发生扰动时,系统内不平衡功率的分配取决于整步功率系数。由 $P_{sik} = E_i U_k \cos \delta_{ik0}$ 分析得出,在扰动功率分配阶段,各机组承担的扰动量的大小与电纳 B_{ik} 成正比,与角度 δ_{ik0} 成反比。电纳越小,则电抗越大,即扰动距离越远,机组承担的扰动量越小。

将式(5)代入转子运动方程,可得

$$\frac{1}{\omega_0} \frac{d\Delta \omega_i}{dt} = - \frac{P_{sik}}{J_i} \left(\frac{\Delta P_i}{\sum_{i=1}^m P_{sik}} \right) \quad (6)$$

当电力系统中出现不平衡功率时,发电机的频率变化主要由整步功率系数、惯性时间常数以及扰动量决定。其中整步功率系数又取决于扰动距离的大小。因此,电网中不同地理位置产生相

同扰动量时,系统频率在暂态过程中也会有不同的变化趋势。机组的整步功率系数越小,惯性时间常数越大,则该机组在扰动瞬间所分担的扰动功率越小,频率变化越慢,并呈现出明显的时空分布特性。

1.2 新能源系统频率响应特性

在电力系统中,系统惯性主要依靠同步发电机和异步发电机等旋转设备。光伏系统无法向系统提供惯量支撑是因为自身没有旋转设备。风机虽然其本身具有旋转设备,但与同步机组不同,风机由变流器调整的电磁转矩与机械功率没有耦合关系,因此也不能向系统提供惯量支撑。另外由于风、光资源的不稳定性,使得新能源机组出力具有不确定性。因此,电网中新能源机组渗透率的增加会使得系统惯性水平降低,所以新能源电网频率的时空分布特性就更加突出。

在不考虑各种控制的情况下,由于新能源机组输出功率与系统频率解耦,无法为系统提供惯量,系统的等效惯性时间常数由发电机惯量聚合得到

$$H_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{j=1}^q S_j} \quad (7)$$

式中, n 、 q 分别表示同步发电机和新能源发电机的数量; S_i 、 S_j 分别为同步发电机 i 和新能源发电机 j 的容量; H_i 为发电机 i 的惯性时间常数。

当电力系统中新能源机组取代部分同步发电机组时,等效惯性时间常数将下降,系统抵抗频率变化的能力也会降低。

从能量的角度上来看,根据转子运动方程,扰动后系统频率变化率为

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P_d}{2H_{\text{sys}} S_{\text{sys}}} \frac{f_0}{2} = \frac{f_0}{2} \frac{\Delta P_d}{E_{\text{sys}}} \quad (8)$$

式中, ΔP_d 为扰动功率; S_{sys} 为系统总额定容量; E_{sys} 为系统额定状态所储存动能。

由式(8)可知,频率的变化主要受扰动量和系统内储存动能的影响。当扰动量一定时,频

率变化率与系统内所储存的动能成反比。从能量的角度来看,在同一扰动和同一时间段下,系统所需要的能量是不变的,新能源机组的加入使得同步机数量减少,即系统在稳态运行时所储存的动能减小,系统频率偏移也会随之增大。

2 电力系统频率分区响应特性

由于合并到干线网络上基本为大容量机组,它们之间的容量和惯性都比较相近,因此,频率响应很大程度上依赖于所处的电气位置。当存在有功缺额时,母线的电压变动很少,每个母线的输出电压基本保持在额定电压附近,因此,各个发电机和母线的电气位置的大小主要取决于该系统网络的参数和构造。如果两个系统之间具有相当密切的联系,由一条长度较远的传输线相连,那么负载变化量在两个地区之间经过一条联络线进行重新分配,然后按照各个同步机所在的电气位置来进行分配。

多区域互联系统如图1所示,在区域一内出现扰动后,扰动量在四个区域中由三条联络线a、b、e来进行分配,每个区域在这一过程中被分配的扰动量由a、b和e三条联络线的参数来确定,而每个区域有关的发电机被分派的扰动量的大小主要依赖其与发生扰动的地点之间的电气距离。与各个区域内发电机处于总体电网中的电气位置相比,各个区域的发电机之间的电气位置更加靠近,各自分配到的扰动量大小几乎没有太大的差异,而当各自的惯性基本相等时,各个区域的发电机频率响应情况基本没有太大差异,但是每个区域所分派的扰动量大小都会有差异,从而导致各个区域的动态频率特征不尽一致,也就是说,系统的动态频率特征可以进行分区讨论。

在大型电力系统动态特性分析研究中,依据文献[7]所提出的方法,通常可以将系统从关联度弱的节点划分为若干小区域。小区域内的发电机关联度较强,频率响应相似,而不同区域内的发电机之间的关联度较弱,频率响应不同。在量化母线和发电机组之间的关联度后,即可通过从

关联度弱的节点划分区域来分析大型电力系统动态频率响应的时空分布特征。

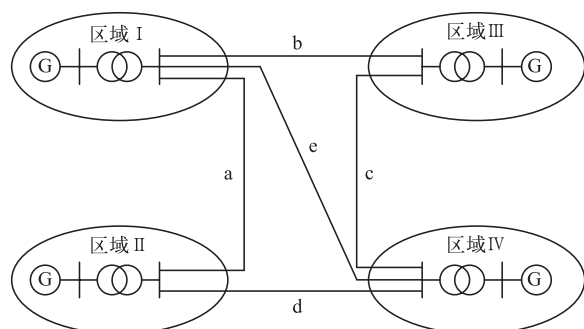


图1 多区域互联系统

Fig. 1 Multi-area interconnection system

由式（1）得电磁功率与转子角之间由向量表示的关系为

$$P = -A \cdot \delta \quad (9)$$

其中

$$A_{ij} = \Delta p_i / \Delta \delta_j \quad \Delta \delta_k = 0, k \neq j \quad (10)$$

$$(A_{ji})^{-1} = \Delta \delta_j / \Delta p_i \quad \Delta p_k = 0, k \neq i \quad (11)$$

式中， A_{ij} 为母线节点转移到发电机节点的有功功率注入。

状态矩阵 A 反映了各发电机间频率响应特性关联度。为了更准确地表征，进一步采用相对关联增益矩阵来反映各发电机间的频率响应特性关联度。相对关联增益矩阵为

$$G = A \cdot (A^T)^{-1} \quad (12)$$

其中，矩阵 G 中元素 G_{ij} 的大小表征各母线间的频率响应的关联度强弱。 G_{ij} 越大，表示母线 i 和母线 j 之间的关联度越强。较小的 G_{ij} 表示在较弱的连接处进行分割，可以得到不同的区域，其动态频率响应会有所不同。

识别弱耦合区域的一种简单且有效的方法是选择一个阈值 g_c 作为关联度的度量值，并通过聚集所有关联度大于给定阈值 g_c 的联络线来形成区域。根据不同的研究目标来选择不同的 g_c 。显而易见，上述原理对系统进行区域划分，其中并没有涉及扰动量以及扰动位置，仅由系统参数和结构来决定。因此，所得结果可以准确地获得频率动态响应的空间特征，只取决于系统的结构特

征，而不受故障位置和扰动大小的影响。

3 仿真分析

以New England 10机39节点系统为例，各发电机详细参数见表1。该系统共包含10台发电机，并与母线31~39相连，39条母线、19处负荷和34条传输线，其中1号机组为外部电网的等效机组。将其划分为四个区域，系统结构如图2所示。

表1 各发电机参数

Tab. 1 Parameters of each generator

发电机	额定容量 /MV·A	惯性常数	有功功率 /MW
1	10 000	5.000	1 000
2	700	4.329	521
3	800	4.475	650
4	800	3.575	632
5	2×300	4.333	508
6	800	4.350	650
7	700	3.771	560
8	700	3.471	540
9	1 000	3.450	830
10	1 000	4.200	250

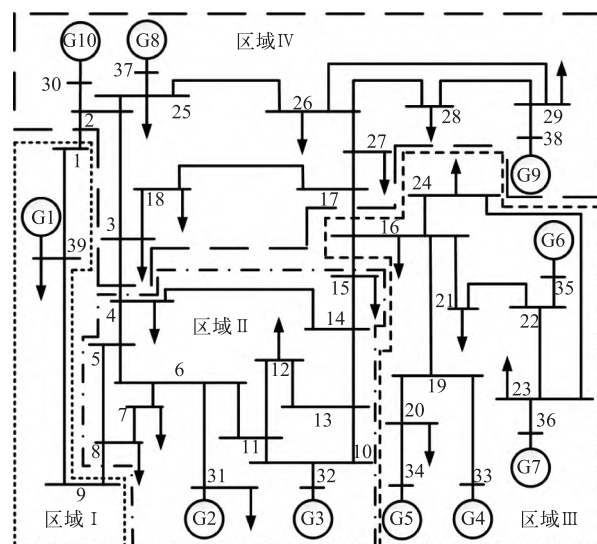


图2 New England 10机39节点系统

Fig. 2 New England 10-machine 39-node system

接下来运用软件Digsilent进行仿真，并设置如下场景：

- 1) 场景一，9号机替换为风机。
- 2) 场景二，增加新能源渗透率，8和9号机

均替换为风机。

3) 场景三, 考虑出力不确定性, 8和9号机均替换为风机, 风速骤降(阵风), 从而风机出力减少。

在场景一下, 首先设置1 s时节点15处负荷由320 MW突增到640 MW, 将9号机替换风机(830 MW), 此时新能源渗透率占比为13.5%。发电机连接母线频率如图3所示。扰动距离越大, 惯性越大或扰动量越小, 则响应延时越长, 频率变化率越小, 频率最低值越大。同步机与新能源机组连接母线频率曲线基本相同, 但也存在不同之处。在扰动时刻, 与新能源机组频率具有突变特性, 这是由于该处母线频率没有惯量支撑; 而同步机自身有惯量的支撑, 因此频率变化相对平缓。综上分析, 同步机与新能源机组的频率动态变化均有时空分布特性。

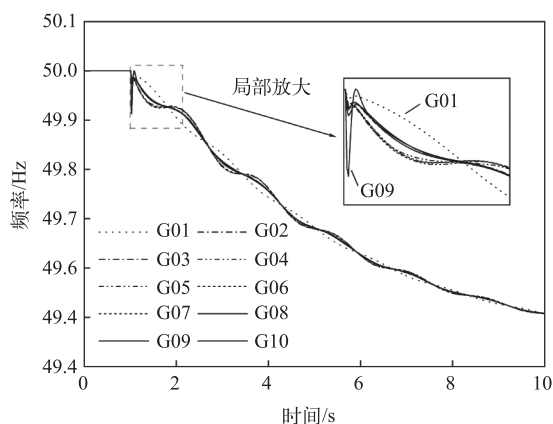


图3 场景一发电机连接母线频率
Fig. 3 Frequency of generators in scenario one

不同区域代表母线频率变化情况, 如图4所示。各区域所含节点之间的频率特性相似, 因此可以假定每个区域都有相近的频率响应特征。由于1号发电机组惯性较大, 区域 I 内频率初始响应最慢, 区域 IV 由于加入了风机使得区域内惯量降低, 各母线频率初始响应最快, 尤其母线29与风机最近, 其频率初始响应时间更快。而与风机较近的其他母线, 其频率初始响应时间与距离成正比, 振荡幅值与距离成反比。因此在实际电网中, 新能源机组附近的频率问题较为严重。

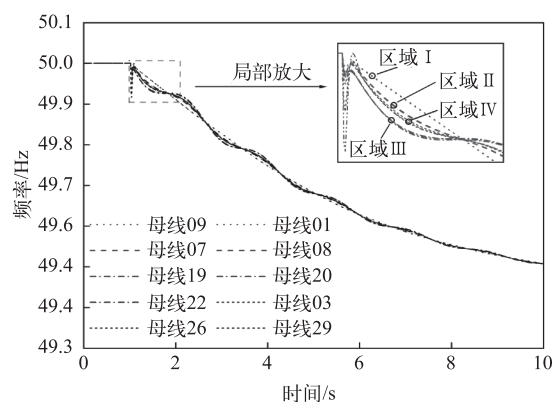


图4 场景一各区域代表母线频率
Fig. 4 Frequency of the busbars of each area in scene one

场景一下扰动不变, 另将8、9号机替换为同容量的风电机组(1 370 MW), 此时新能源渗透率占比为22.3%。图5中实线和虚线分别代表场景一和场景二时区域IV内各母线频率。代表母线度量指标见表2。新能源渗透率增加时, 其频率曲线在同一扰动下进一步恶化, 主要表现为响应时刻较短, 最低值更小, 平均频率变化率更大。新能源渗透率的增加, 伴随着系统内惯量减小, 导致频率问题更加严重, 在其他区域内也有相同结论。

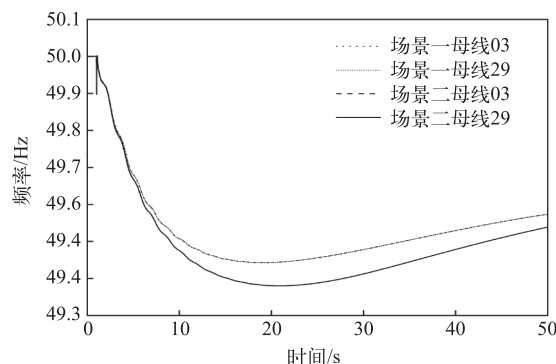


图5 区域IV代表母线频率
Fig. 5 Frequency of representative busbars in Region IV

表2 不同新能源渗透率下代表母线度量指标

Tab. 2 Metrics of representative busbars under different new energy penetration rates

区域IV观测点	不同仿真场景	平均变化率 / (Hz/s)	频率最低值 / Hz	最大偏移延时 / s
母线3	场景一	0.081 460	49.442 84	18.381 67
母线3	场景二	0.084 747	49.380 01	19.961 67
母线29	场景一	0.081 017	49.442 83	18.371 67
母线29	场景二	0.084 337	49.380 00	19.951 67

场景一和场景二下频率偏差达到0.02 Hz时,所需时间见表3。新能源机组渗透率增加的情况下,各个发电机频率初始响应时间相较于场景一整体明显减少,由此可以看出,新能源机组渗透率的增加,使得频率响应速度加快,给电力系统带来了更严重的影响。

表3 频率偏差达到0.02 Hz时所需时间

Tab. 3 Time for frequency deviation to reach 0.02 Hz

(单位: s)

发电机	场景一	场景二	发电机	场景一	场景二
G01	0.29	0.28	G06	0.09	0.03
G02	0.13	0.03	G07	0.09	0.03
G03	0.12	0.03	G08	0.03	0.02
G04	0.08	0.03	G09	0.02	0.02
G05	0.09	0.03	G10	0.02	0.02

场景三是考虑风速骤降而出力减少。设置在 $t=8.0$ 时,9号风机因风速骤降而降低200 MW的有功功率。各发电机连接母线频率变化情况如图6所示。

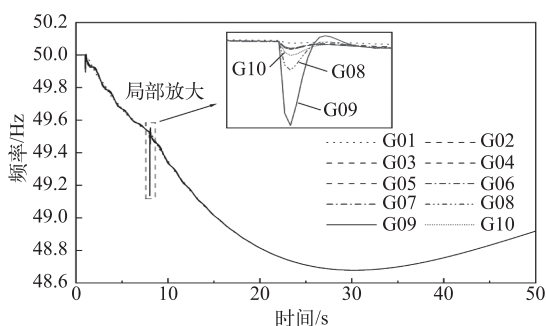


图6 场景三发电机连接母线频率

Fig. 6 Frequency of the generator in scenario three

当9号机减少出力瞬间,新能源机组9号机频率初始下跌幅度较大,同一区域内的8号机和10号机初始频率下跌幅度依次减小,频率变化率进一步增大。可见,新能源机组出力不确定时,同一区域内其余同步机分担了更多的扰动量。

4 结束语

从频率动态响应特性出发,得到了频率时空分布特性的影响因素,主要包括扰动距离、惯量以及扰动量。在考虑新能源机组并网的情况下,对于频率惯性响应时空分布特性进行了研究。当新能源

渗透率增加时,扰动后频率响应延时减小,最低值减小,频率变化率增大;扰动发生时刻,新能源机组连接母线频率具有突变特性;与新能源机组距离越近,初始频率下跌幅度越大,因此电网中并入的新能源机组附近的频率问题较为严重。

参考文献

- [1] 孟庆强,李湘旗,禹海峰,等.考虑源-荷不确定性的储能电站优化规划[J].太阳能学报,2021,42(10):415-423.
- [2] BIAN Y, WYMAN H, LI F, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.
- [3] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
- [4] WILSON D, YU J, ASHWAL N, et al. Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response requirements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 1-8.
- [5] 王中,黎丽丽,李振华,等.考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):65-73.
- [6] 马宁宁.大规模电网中频率动态时空分布特性及影响机理研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [7] 刘红岩,吴强,张明宇,等.电力系统动态频率分区响应特征分析方法研究[J].电气工程,2018,6(4):311-324.

作者简介

杨德友(1983—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定与控制、新能源电网优化运行。

刘云鹏(1996—),男,硕士,研究方向为电力系统频率与惯性。

(收稿日期:2022-01-25)