

新能源高渗透的电力系统频率特性分析

张剑云, 李明节

(国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031)

Analysis of the Frequency Characteristic of the Power Systems Highly Penetrated by New Energy Generation

ZHANG Jianyun, LI Mingjie

(National Power Dispatching Center, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: With the rapid development of wind farms and photovoltaic plants, the future power systems might experience the decline of fundamental frequency characteristics due to the severe reduction of power supply of thermal and hydropower plants. In order to study such decline, the frequency model of the power system highly penetrated by new energy was proposed along with its transfer functions. And the steady state errors (SSEs) of frequency due to frequency or power step response were deployed in this paper. A thorough analysis was performed on the stability and the SSEs of the highly penetrated power system. The dynamic frequency response characteristic (DFRC) of the highly penetrated power system was defined and the upper limit of the proportion of new energy generation was estimated. Assuming that the capacity of frequency control provided by the new energy generation was enough, the two schemes of frequency control of new energy generation were introduced and compared, which make the difference in the SSEs of the highly penetrated power system. Finally, time domain digital simulations were performed to verify the proposed conclusions and to reveal the trend of frequency characteristics of future power systems.

KEY WORDS: new energy; high penetration; frequency characteristics; steady state error of frequency; dynamic frequency response characteristic; frequency control

摘要: 随着风电和光伏的快速发展,水电和火电在发电结构中比重的大幅下降将导致未来电力系统的频率特性出现变化。为研究系统频率特性的变化,该文首先给出新能源高渗透的电力系统的频率模型和传递函数。引入频率阶跃或功率阶跃引起的稳态频率误差,对系统的稳定性和稳态频率误差展开详细分析。定义系统的动态频率响应系数,并给出新能源发电比重上限的估计。假定新能源发电的调频容量充足,提出新能源参与频率控制的2种方式,研究比较它们对系统稳态频率误差的影响。最后通过时域数字仿真验证所得结论,并揭示未来电力系统频率特性的变化趋势。

关键词: 新能源; 高渗透率; 频率特性; 稳态频率误差; 动态频率响应系数; 频率控制

0 引言

近年来,我国风电、光伏装机容量已跃居世界第一。随着发电能源结构的清洁低碳化,预计2035年,我国新能源装机容量将超过火电,成为第一大电源^[1]。新能源在发电结构中比重的迅速上升,不仅给电力系统的频率特性带来重大影响,也在电力电子和电力系统领域引发不同关注点。

一方面,基于电力电子技术的新能源场站自身具有很强的频率控制能力,可以与各类电源一起共同参与系统调频^[2-7]。较为激进的学术观点甚至认为,电力系统可以实现100%的电力电子化新能源发电^[8-9]。

另一方面,在实际电力系统的运行中,系统转动惯量呈降低趋势,故障扰动引发系统频率较大波动^[10-11]。使用详细模型对国内外大电网的系统仿真已经表明,不参与调频的新能源大量发电,对电力系统频率安全存在显著的负面影响^[12-14]。

电力系统的整体频率响应能力,主要由各个电源的转动惯量与调频能力叠加而成。不参与调频的电源比重越高,系统频率响应能力越低。在电力系统的电力电子化过程中,亟需解决单个电源调频与系统整体需求之间的矛盾,我国电力发展面临两个重大问题。一是从电力系统整体规划的角度来看,需要定量研究系统频率特性随新能源渗透率的变化趋势与总体规律,进而估计不调频电源最大占比的安全警戒线。二是从电力电子型电源自身的角度来看,需要定量比较哪种调频方式能够有效地提升

系统的频率特性，从而合理发挥新能源场站的作用，引导电力电子并网控制技术的发展方向。

本文首先建立计及新能源渗透率的电力系统频率传递函数，然后基于频域分析方法提出系统的 2 个稳态性能指标，并定义系统的动态频率响应系数，对系统的稳定性、稳态性能和动态性能展开详细分析。接着提出新能源在系统中参与频率控制的 2 种方式，并加以研究比较。最后对新能源高渗透的电力系统进行时域数字仿真，验证其动态性能。

1 计及新能源渗透率的电力系统简化频率模型

电力系统频率模型是一个闭环控制系统，主要包括同步发电机与负荷、涡轮机及其调速器。本文目标是研究电力系统总体频率特性，因此不考虑频率的分散性与功角稳定问题，并忽略具体的调速器控制、涡轮机模型、限幅等非线性环节与二次调频。

根据电力系统领域的经典文献^[15]，无论是水电还是火电等同步发电机，都可以简化为图 1 所示的控制闭环，进而聚合成电力系统的频率模型。

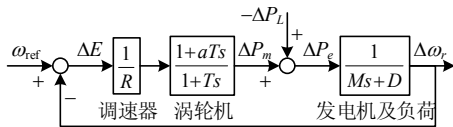


图 1 同步机组发电系统的简化聚合频率模型

Fig. 1 Simplified and aggregated frequency model of power system of synchronous generators

图中， M 为和转动惯量相关的转子时间常数， D 为负荷的有功频率响应系数， T 为涡轮机的等值惯性时间常数。 a 为涡轮机特征系数，对于水轮机 $a=-2$ ，对于汽轮机 $0 < a < 1$ 。调速器以纯增益 $1/R$ 简化表示。

对于新能源高渗透的电力系统，需要在上述模型的基础上引入表征渗透率的变量。为简化分析，假定新能源发电比重的提高，是通过关停水火电等常规同步发电机组实现的。

定义 1 常规同步机组发电系数：

$$K = \frac{\text{常规同步机组发电出力(MW)}}{\text{系统负荷功率(MW)}} \quad (1)$$

如果新能源渗透率不断提高，常规同步机组发电系数 K 将不断下降，取值范围是 $0 \leq K \leq 1$ 。

图 1 中的模型是以发电机(或涡轮机)的容量为基准的。如果改用系统负荷功率作为基准值，那么

同步机组的转子时间常数和涡轮机的输出功率都应乘以系数 K 。从而得到新能源高渗透电力系统的简化聚合频率模型，如图 2 所示。此模型暂不考虑新能源发电具备的频率控制能力。

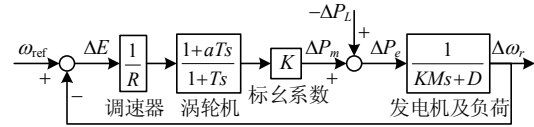


图 2 新能源高渗透电力系统的简化聚合频率模型

Fig. 2 Simplified and aggregated frequency model of power system highly penetrated by new energy generation

2 新能源渗透率对电力系统频率特性的影响

随着新能源渗透率的提高和常规同步机组发电系数 K 的下降，电力系统的稳定性和频率特性将随之变化。根据图 2 所示的频率传递函数模型，本节分别从闭环控制稳定性、频域分析和时域分析等 3 个方面对此展开理论分析。

2.1 闭环控制的稳定性

图 2 是一个闭环控制系统，必须满足稳定性条件。系统的开环传递函数为

$$H(s) = \frac{a}{MR} \frac{s + \frac{1}{aT}}{s^2 + (\frac{1}{T} + \frac{D}{MK})s + \frac{D}{MTK}} \quad (2)$$

相应地，闭环系统的特征方程为

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3)$$

其中：

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{D}{MTK} + \frac{1}{MTR} \\ \zeta = \frac{1}{2\omega_n} (\frac{1}{T} + \frac{D}{MK} + \frac{a}{MR}) \end{cases} \quad (4)$$

根据劳斯判据^[16]，其特征方程(3)的系数应满足以下条件：

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{D}{MTK} + \frac{1}{MTR} > 0 \\ 2\zeta\omega_n = \frac{1}{T} + \frac{D}{MK} + \frac{a}{MR} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据定义， M 、 D 、 T 、 R 均为正数。

对于新能源渗透的火电系统，由于汽轮机 $a > 0$ ，因此当火电发电系数 $K > 0$ 时，如果火电有足够的调频容量，则可满足闭环稳定条件。

对于新能源渗透的水电系统，由于水轮机水锤

效应 $a < 0$, 因此如果水电发电比重过高, 系统可能产生超低频振荡^[15]。为满足闭环稳定条件, 当 $R < -aT/M$ 时, 水电发电系数应满足:

$$K < \frac{DRT}{-aT - MR} \quad (6)$$

2.2 基于频域的稳态性能分析

误差传递函数是研究闭环控制系统性能的重要工具^[16]。在图2所示系统中, 与频率误差相关的传递函数主要有2个, 分别如下。

1) 参考频率输入的频率误差传递函数:

$$G_1(s) = \frac{\Delta E}{\Delta \omega_{\text{ref}}} = \frac{1}{1+H(s)} = \frac{1}{MTK} \frac{(1+Ts)(KMs+D)}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \quad (7)$$

2) 功率扰动的频率误差传递函数:

$$G_2(s) = \frac{-\Delta E}{\Delta P_L} = \frac{-1}{1+H(s)} = \frac{-1}{MTK} \frac{1+Ts}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \quad (8)$$

根据上述传递函数和终值定理^[16], 可以相应定义下列2个稳态频率误差。

定义2 参考频率阶跃响应的稳态频率误差:

$$E_1 \triangleq \Delta E(t)|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} G_1(s) = \frac{RD}{RD+K} \quad (9)$$

如果 E_1 较大, 意味着当参考频率受扰时, 系统稳态频率偏差较大。所以稳态频率误差 E_1 的数值越小, 表明系统频率维持与参考频率同步的能力越强。

定义3 功率阶跃响应的稳态频率误差:

$$E_2 \triangleq -\Delta E(t)|_{t \rightarrow \infty} = -\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} G_2(s) = \frac{R}{RD+K} \quad (10)$$

如果 E_2 较大, 意味着当负荷功率出现扰动时, 系统稳态频率偏差较大。所以稳态频率误差 E_2 的数值越小, 表明系统频率抗扰动的能力越强。

根据式(9)、(10), 随着常规同步机组发电系数 K 的降低, 稳态频率误差 E_1 和 E_2 均会增大, 系统频率维持工频同步和抗扰动的能力均会下降。

一个极端的例子是假如发电系数 K 从1降低至0(即发电全部由新能源承担)。考虑系统参数的典型值^[15](下降率 R 为5%, 负荷有功响应系数 D 为1%)。则稳态频率误差 E_1 从0.0005增大到1.0, 系统基本丧失了维持与频率参考信号同步的能力。而稳态频率误差 E_2 从0.05增大到100, 相同的功率扰动引起的频率偏移将增大2000倍, 系统抗扰动能力极差。实际上, 当发电系数 K 趋于0时, 图2所示的系统模型结构变为图3所示。

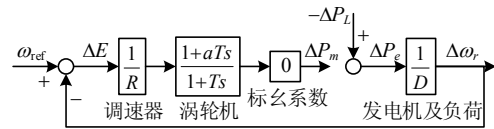


图3 新能源高渗透电力系统的简化聚合频率模型($K=0$)
Fig. 3 Simplified and aggregated frequency model of power system highly penetrated by new energy generation ($K=0$)

电力系统频率的正常运行将遭到破坏。一方面, 系统频率模型由闭环控制变成了开环控制, 失去与工频同步运行能力(对应指标 E_1 的数值剧增)。另一方面, 系统的频率调整仅依靠负荷的频率响应系数 D (数值很小, 仅为1%~2%), 系统抗扰动能力极差(对应指标 E_2 的数值剧增)。

因此, 系统频率的稳态特性可以由频率误差 E_1 和 E_2 这2个指标来有效量化。通常情况下, 要求负荷功率变化10%, 系统频率变化不超过1Hz。即: 负荷功率0.1pu的阶跃响应, 频率变化不超过0.02pu(对于50Hz系统)。则要求 E_2 满足:

$$E_2 = \frac{R}{RD+K} < \frac{0.02(\text{pu})}{0.1(\text{pu})} \quad (11)$$

所以:

$$K > 5R - RD \triangleq K_0 \quad (12)$$

此时有:

$$E_1 = \frac{RD}{RD+K} < \frac{RD}{RD+5R-RD} = \frac{D}{5} \quad (13)$$

约为0.002~0.004。因此当发电系数 K 降低至 $K_0=5R-RD$ 时, 稳态频率误差 E_1 不超过 $D/5$, E_2 不超过0.2。

另外, 由于调速器的工业控制通常采用超前滞后校正环节, 当 $s \rightarrow 0$ 时调速器的传递函数等于其增益, 而与具体的校正设计无关, 因此稳态性能指标不仅便于计算, 而且适用模型范围较广。

综上所述可以得到以下结论:

结论1 电力系统的稳态频率误差 E_1 和 E_2 随常规同步机组发电系数 K 下降而增大。这表明, 如果新能源不提供频率控制能力, 系统频率维持工频同步和抗扰动的能力随新能源渗透率提高而下降。

2.3 基于时域的动态性能分析

2.2节给出了频率闭环控制系统的稳态性能指标, 本节进一步研究频率闭环控制系统的动态性能。在电力系统的时域仿真中, 实际运行最为关注的是在出现大的功率扰动后, 系统动态频率的最大

偏移值。

首先借助拉普拉斯变换, 推导计算 $G_2(s)$ 的阶跃响应及其超调量。当功率扰动为单位阶跃函数时, 频率误差的响应为

$$\Delta E = \frac{1}{s} G_2(s) = -E_2 \frac{\omega_n^2}{z} \frac{s+z}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)} = -E_2 \left[\frac{\omega_n^2}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)} + \frac{1}{z} \frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \right] \quad (14)$$

式中: $z=1/T$; ω_n 、 ζ 的定义同式(4), 是与发电系数 K 有关的函数。

在式(14)中的每一项均可在拉普拉斯变换表中查到其逆变换^[16], 从而得到频率误差的时间响应 $\Delta E(t)$ 。对时间求导后令其等于 0, 可以得到峰值时间 t_p , 进而计算得到超调量:

$$\sigma\% = \frac{\Delta E(t_p) - \Delta E(\infty)}{\Delta E(\infty)} = \frac{-\Delta E(t_p) - E_2}{E_2} \quad (15)$$

对于 $0 < \zeta < 1$ 的系统, 峰值时间为

$$t_p = \frac{\arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) + \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\frac{\omega_n}{z} - \zeta}\right)}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (16)$$

相应的超调量为

$$\sigma\% = \sqrt{1 - 2\zeta \frac{\omega_n}{z} + \frac{\omega_n^2}{z^2}} \exp(-\zeta\omega_n t_p) \quad (17)$$

对于 $\zeta > 1$ 的系统, 峰值时间为

$$t_p = \frac{1}{a_0 - b_0} \ln\left(\frac{z - a_0}{z - b_0}\right) \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} a_0 = \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \\ b_0 = \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \end{cases} \quad (19)$$

相应的超调量为

$$\sigma\% = \frac{a_0 b_0}{b_0 - a_0} \left[\left(\frac{1}{z} - \frac{1}{a_0}\right) e^{-a_0 t_p} - \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{b_0}\right) e^{-b_0 t_p} \right] \quad (20)$$

由式(16)—(20)可见, 峰值时间与超调量都是与发电系数 K 有关的函数。

下面研究发电系数 K 对系统功率-频率特性的影响。传统的系统频率响应系数^[15]为

$$\beta \triangleq \frac{\Delta P_L}{-\Delta E(\infty)} = \frac{1}{R} + D$$

β 表示引起单位频率变化所需的功率扰动值 (以百分比为单位)。其频率变化采用的是稳态偏差, 所以是稳态性能指标。

本节前面已经计算出超调量 $\sigma\%$, 能够得到动态频率的最大偏移, 可将上述定义推广为动态性能指标。根据式(10)、(15)有如下定义。

定义 4 系统的动态频率响应系数

$$\beta_d \triangleq \frac{\Delta P_L}{-\Delta E(t_p)} = \frac{1}{E_2(1+\sigma\%)} = \frac{RD+K}{R(1+\sigma\%)} \quad (21)$$

系数 β_d 的数值越小, 表明系统频率抗扰动的动态特性越差。

与传统的 β 相比, 本文提出的 β_d 能够同时计及频率的动态和新能源的渗透率。当 $\sigma\%=0$ 、 $K=1$ 时, 传统的 β 是 β_d 的一个特殊情况。

动态频率特性通常比稳态指标的要求更高。仍以负荷功率变化 10%、系统频率变化不超过 1Hz 的要求为例, 稳态指标的要求是式(11), 而动态频率特性要求:

$$\beta_d = \frac{1}{E_2(1+\sigma\%)} > \frac{0.1(\text{pu})}{0.02(\text{pu})} \quad (22)$$

即:

$$\sigma\% < \frac{RD+K}{5R} - 1 = \frac{1}{5R} K + \frac{D}{5} - 1 \quad (23)$$

式(17)或(20)给出 $\sigma\%$ 是关于 K 的一个超越函数, 而式(23)给出 $\sigma\%$ 位于一个关于 K 的斜线下方区域。所以工程上可以采用作图法给出发电系数 K 的取值范围的数值解。下面给出其近似解。

注意到对于实际的电力系统, 参数 D/M 通常很小(数量级约为千分之一)。所以当 $K \gg D/M$ 时, 根据式(4)可知:

$$\begin{cases} \omega_n \approx \sqrt{\frac{1}{MTR}} \\ \zeta \approx \frac{\sqrt{MTR}}{2} \left(\frac{1}{T} + \frac{a}{MR} \right) \end{cases} \quad (24)$$

ω_n 、 ζ 只与系统参数有关, 而与 K 的变化基本无关。将式(24)代入式(17)或(20), 可计算得到一个与 K 无关的超调量, 将其记为 $\sigma\%$ 。

为满足负荷功率变化 10%、系统最大频率变化不超过 1Hz 的要求, 根据式(23)发电系数应满足:

$$K > 5R(1+\sigma\% - \frac{D}{5}) \approx 5R(1+\sigma_0\% - \frac{D}{5}) \quad (25)$$

所以在新能源不提供调频的情况下，其渗透率上限的估计值为 $1 - 5R(1 + \sigma_0\% - D/5)$ 。对于典型的系统参数^[15]，有 $R = 5\%$ ， $T = 6s$ ， $a = 0.333$ ， $M = 12s$ ， $D = 1\%$ 。由式(24)计算得出 $\sigma_0\% = 91.66\%$ ，由式(25)计算得出 K 的下限估计值为 47.87% 。所以新能源发电占比的上限估计约为 52% (只考虑频率特性的约束)。

当 $K \gg D/M$ 时，动态频率响应系数式(21)的近似表达式为

$$\beta_d \approx \frac{RD + K}{R(1 + \sigma_0\%)} \quad (26)$$

如果电源的调频容量充足，则 β_d 与发电系数 K 近似呈线性关系。随着发电系数 K 降低，系统的动态频率特性也相应变差。

如果电源的调频容量不足，功率扰动量超出发电机组的调频容量，相当于在式(26)中令 $1/R \rightarrow 0$ 。则 $\beta_d \approx D/(1 + \sigma_0\%)$ ，即系统的动态频率响应主要取决于负荷的频率响应系数，频率变化的斜率将显著变陡。

综上所述有以下结论。

结论 2 电力系统的动态频率响应系数 β_d 随常规同步机组发电系数 K 下降而下降。这表明，如果新能源不提供频率控制能力，系统频率抗扰动的动态特性随新能源渗透率提高而变差。

3 新能源频率控制方式对电力系统频率特性的影响

根据上文的研究结论，如果不使用新能源发电的频率控制能力，那么随着常规同步机组发电系数的降低，电力系统的频率特性将不断恶化，这将制约新能源发电渗透率的提高。本节研究如何合理使用新能源场站(也包括其他电力电子功率设备)的频率控制能力，较好地遏制电力系统频率特性的下降。本文假定：

- 1) 所有的新能源发电都能参与调频；
- 2) 新能源发电能提供足够的调频容量。

当常规同步机组发电系数为 K 时，新能源的发电系数近似为 $1 - K$ 。由于新能源发电自身转动惯量很小，并采用快速的电力电子控制技术^[17]，故可忽略其涡轮机动态，并以纯增益 A 简化表示(当上述 2 条假定满足时， $A > 0$)。

新能源参与频率控制的技术较多，如按照控制反馈原理来分类，有 2 种基本方式。一种是功率闭

环方式，如图 4 所示；另一种是参考频率闭环方式，如图 5 所示。两者的主要差异在于：功率闭环方式下，新能源不提供工频参考信号，而参考频率闭环方式下，新能源提供工频参考信号。具体的调频控制技术，可以在这 2 种方式的基础上调整。

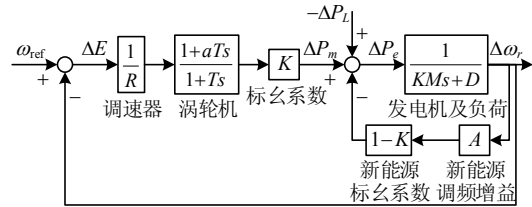


图 4 新能源参与调频的电力系统(功率闭环)
Fig. 4 Power system with frequency control of new energy generation (power closed-loop)

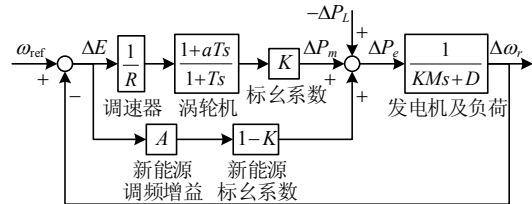


图 5 新能源参与调频的电力系统(参考频率闭环)
Fig. 5 Power system with frequency control of new energy generation (frequency reference closed-loop)

下面分别研究 2 种频率控制方式下，系统的稳态频率特性，进而分析其动态频率特性。

3.1 新能源功率闭环方式下的系统稳态频率特性

对于功率闭环方式，经过传递函数运算，图 4 所示的系统可以变换为图 6(相当于用 D' 代替图 2 中的参数 D)。

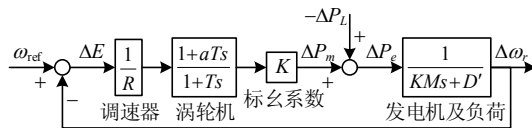


图 6 功率闭环方式的新能源高渗透电力系统
Fig. 6 Power system highly penetrated by new energy generation with frequency control via power closed-loop

图中：

$$D' = D + (1 - K)A \quad (27)$$

易知 $D' \geq D$ 。可见，新能源通过功率闭环方式参与频率控制，相当于提高负荷的频率响应系数。

类似于式(11)，如果要求稳态频率误差 E_2 满足：

$$E_2 = \frac{R}{RD' + K} < \frac{0.02(\text{pu})}{0.1(\text{pu})} \quad (28)$$

则根据式(27)、(28)有：

$$A > \frac{5R - K - RD}{R(1 - K)} \quad (29)$$

假如常规同步机组发电系数 K 趋近于 0，则要求新能源调频增益：

$$A > 5 - D \approx 5 \quad (30)$$

这表明，合理设定的调频增益 A 可以使稳态频率误差 E_2 满足合适的稳态性能要求。

但是对于稳态频率误差 E_1 ：

$$E_1 = \frac{RD'}{RD' + K} \geq \frac{RD}{RD + K} \quad (31)$$

这意味着，功率闭环方式会恶化稳态频率误差 E_1 。当 $K=0$ 时， E_1 仍将增大到 1。

结论 3 新能源发电以功率闭环方式参与调频，可以降低稳态频率误差 E_2 ，增强系统频率抗扰动的能力，但会增大稳态频率误差 E_1 ，恶化系统维持与工频同步的能力。

3.2 新能源参考频率闭环方式下的系统稳态频率特性

对于参考频率闭环方式，经过传递函数运算，图 5 所示的系统可以变换为图 7(相当于用 R' 、 a' 分别代替图 2 中的参数 R 、 a)。

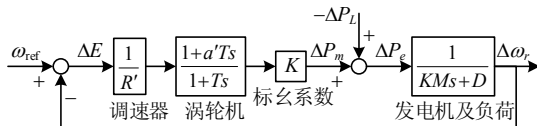


图 7 参考频率闭环方式的新能源高渗透电力系统

Fig. 7 Power system highly penetrated by new energy generation with frequency control via frequency reference closed-loop

其中：

$$\begin{cases} R' = \frac{K}{K + RA(1 - K)}R \\ a' = \frac{Ka + RA(1 - K)}{K + RA(1 - K)} \end{cases} \quad (32)$$

容易证明： $R' \leq R$ ， $a \leq a' < 1$ 。可见，新能源通过参考频率闭环方式参与频率控制，相当于提高调速器的增益。

根据式(32)可得：

$$\begin{cases} E_1 = \frac{R'D}{R'D + K} = \frac{RD}{RD + K'} \\ E_2 = \frac{R'}{R'D + K} = \frac{R}{RD + K'} \end{cases} \quad (33)$$

其中：

$$K' = K + RA(1 - K) \quad (34)$$

由于 $K' \geq K$ ，所以有：

$$\begin{cases} E_1 = \frac{RD}{RD + K'} \leq \frac{RD}{RD + K} \\ E_2 = \frac{R}{RD + K'} \leq \frac{R}{RD + K} \end{cases} \quad (35)$$

由上述公式即可得到以下结论。

结论 4 新能源发电以参考频率闭环方式参与调频，可以同时降低稳态频率误差 E_1 和 E_2 ，从而同时增强系统频率抗扰动与维持工频同步的能力。

3.3 新能源参与频率控制的系统动态频率特性

本节简要分析 2 种频率控制方式下，系统的动态频率特性。

在发电系数 K 和新能源调频增益 A 相同时，有：

$$E_2 = \frac{R'}{R'D + K} = \frac{R}{RD' + K} \quad (36)$$

所以，2 种频率控制方式的 E_2 是相同的。

经演算，两者的动态频率响应系数 β_d 也是相等的，可以统一写为

$$\beta_d = \frac{1}{E_2(1 + \sigma\%)} = \frac{RD' + K}{R(1 + \sigma\%)} = \frac{RD + K'}{R(1 + \sigma\%)} \quad (37)$$

由于 $D' \geq D$ 和 $K' \geq K$ ，比较式(37)、(21)可得到以下结论。

结论 5 新能源发电参与频率控制的两种闭环方式，均可提高系统频率在抗扰动方面的动态特性。

4 新能源高渗透电力系统的时域仿真分析

本节对简化模型进行分析，展示频率变化的趋势与关键因素。具体的数值结论与参数取值有关，实际电网中的频率特性仍应以详细模型的电力系统时域仿真为准。使用 Matlab 对 3 种场景下的新能源高渗透电力系统进行数字仿真和分析，并与前面的分析结论比较。

场景 1 不考虑新能源调频(如图 2 所示)，记为系统 S1。选择典型火电发电系统的参数^[15]如下： $R=5\%$ ， $T=6s$ ， $a=0.333$ ， $M=12s$ ， $D=1\%$ 。

场景 2 考虑新能源以功率闭环方式调频，且调频容量充足(如图 4 所示)，记为系统 S2。选取新能源调频增益 $A=5$ ，其余系统参数同系统 S1。

场景 3 考虑新能源以参考频率闭环方式调频，且调频容量充足(如图 5 所示)，记为系统 S3。选取 $A=5$ ，其余系统参数同系统 S1。

4.1 新能源渗透率对电力系统频率特性的影响

首先比较系统 S1、S2、S3 的动态频率响应系数 β_d 。根据式(21)、(37)进行计算,可以绘出引起系统每 1Hz 变化所需的功率扰动值(百分比),如图 8 所示。

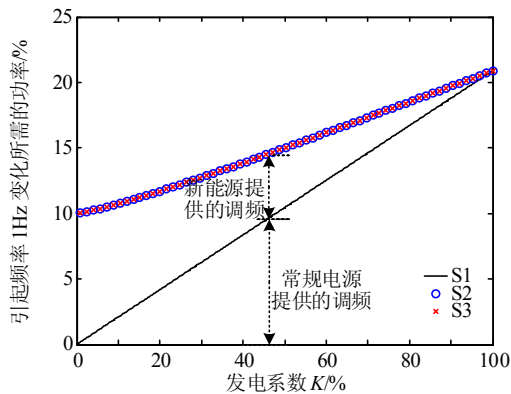


图 8 不同发电系数 K 下新能源高渗透电力系统的动态频率响应特性

Fig. 8 Dynamic frequency response characteristics of power systems highly penetrated by new energy generation with different K

可见,系统 S1 的动态频率响应特性与发电系数 K 基本呈线性关系,当发电系数 K 降低时,系统频率特性变差,这与结论 2 一致。

而系统 S2、S3 的动态频率响应系数完全相同,且优于系统 S1,这与式(37)和结论 5 一致。图 8 同时表明,随着新能源渗透率的增大,为了遏制动态频率特性的下降,电力系统越来越依靠新能源发电所提供的调频能力。

然后,比较不同渗透率情况下的系统频率响应。当功率出现 10% 的阶跃时,系统 S1 的频率时间响应如图 9 所示。可见随着火电发电系数 K 降低

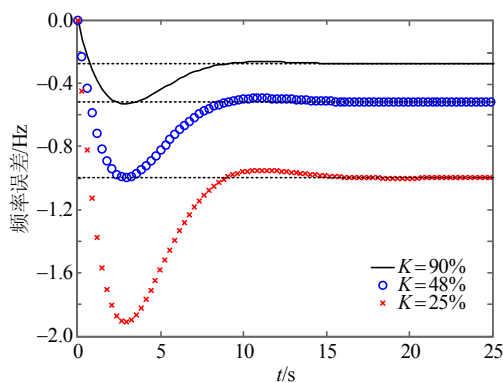


图 9 不同发电系数 K 下新能源高渗透电力系统 S1 的频率误差响应(功率阶跃 10%)

Fig. 9 Frequency error responses of power system highly penetrated by new energy generation with different K (power step 10%)

(90%、48%、25%),系统频率特性显著下降。而超调量与上升时间基本保持不变。

根据式(12)、(13),对于 10% 的功率阶跃,当 $K=25%$ 时,稳态频率偏差能控制在 1Hz 以内,这与图 9 的仿真结论相符。由于存在超调量,动态频率性能的要求更高。如果欲将动态频率偏差控制在 1Hz 以内,式(25)给出的 K 值下限约为 48%,这与图 9 的仿真结论相符。

4.2 新能源频率控制方式对系统频率特性的影响

对系统 S1、S2、S3 施加参考频率阶跃和功率扰动阶跃,以此来分析它们的动态频率响应差异。

施加参考频率阶跃(1Hz)。在相同的火电发电系数情况下($K=48%$),系统 S1、S2、S3 的频率时间响应如图 10 所示。可见,相对于系统 S1 和 S3,系统 S2 的稳态频率偏差较大,这与结论 3 相符。这表明,新能源如果采用功率闭环控制来参与调频,会导致系统维持工频同步的能力显著变差。

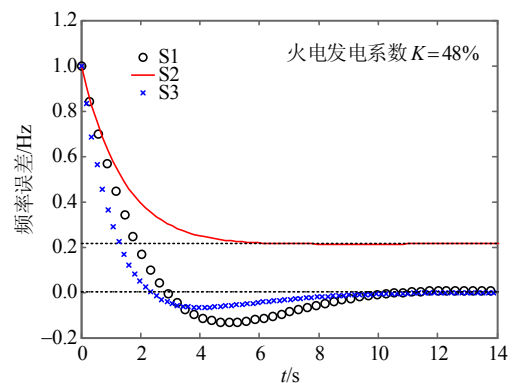


图 10 不同新能源高渗透电力系统的频率误差响应(参考频率阶跃 1Hz)

Fig. 10 Frequency error responses of different power systems highly penetrated by new energy generation (frequency reference step 1Hz)

施加功率阶跃(10%)。在相同的发电系数情况下($K=48%$),系统 S1、S2、S3 的频率时间响应如图 11 所示。可见系统 S2、S3 的动态频率偏差完全一致,且优于系统 S1,这与结论 5 一致。这表明,新能源参与频率控制能够提高系统频率的抗扰动能力。

综合图 10、11 可知,在相同的火电发电系数下,系统 S1 的参考频率阶跃响应较差,系统 S2 的功率阶跃响应较差。只有系统 S3 在两个阶跃响应下的稳态误差都较小,性能优于 S1 和 S2,这与结论 4 相符。

因此,在新能源高渗透的电力系统中,新能源

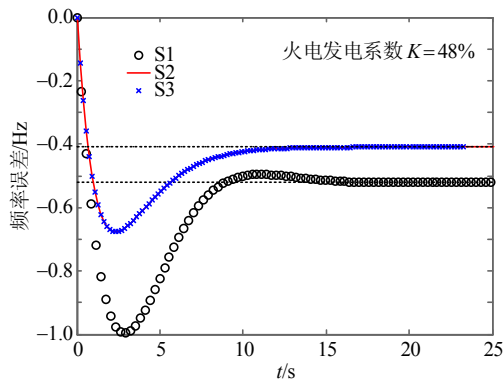


图 11 不同新能源高渗透电力系统的频率误差响应
(功率阶跃 10%)

Fig. 11 Frequency error responses of different power systems highly penetrated by new energy generation (power step 10%)

应当采用参考频率闭环控制来参与调频, 这样才可以较为全面地提高系统的频率特性。

4.3 新能源高渗透的电力系统频率特性发展趋势

图 8 表明, 随着新能源渗透率的增大, 电力系统的频率特性将更主要地取决于新能源发电所能提供的调频容量和调频能力。所以新能源渗透率能够提高的关键在于新能源发电的储能技术与频率控制技术。

在未来, 假定所有的新能源发电都已采用参考频率闭环方式参与调频, 并且能提供足够的调频容量。对这样的系统施加参考频率阶跃和功率扰动阶跃, 分析其动态频率响应。图 12 表明, 当火电发电系数 K 降低至 10% 时, 系统 S3 对于 1Hz 参考频率和 10% 功率的阶跃响应的频率误差可控制在合理范围内。

图 12 也表明, 在未来电力系统中, 系统频率

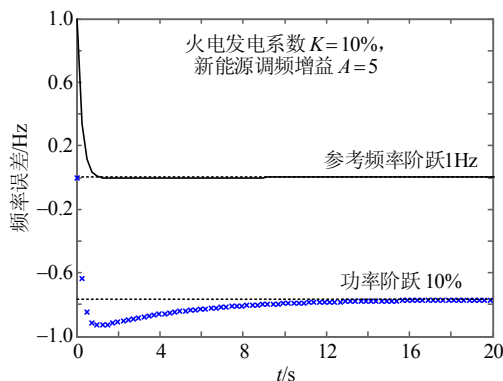


图 12 新能源高渗透电力系统 S3 的频率误差响应
($K=10\%$)

Fig. 12 Frequency error responses of power system highly penetrated by new energy generation S3 ($K=10\%$)

特性将出现新的发展趋势: 系统频率变化的超调量并不大, 但是上升时间很短。这就意味着, 在高渗透率情况下, 系统频率将会变得像电压那样易于闪变。如果电网或用户对于频率变化率(RoCoF)有一定的要求, 那么系统中就需要必要的虚拟惯量与相应的控制策略, 以降低频率的闪变。

5 结论

针对新能源高渗透的情况, 本文研究了电力系统频率的稳态性能指标和动态响应系数, 并回答了系统频率方面的 2 个基本问题:

1) 新能源渗透率如何影响系统频率特性。在新能源不参与系统调频的情况下, 系统频率特性将随新能源渗透率提高呈下降趋势。本文基于频率传递函数模型对此趋势进行了量化分析, 同时给出了新能源渗透率上限的估计方法。

2) 新能源发电如何参与系统调频。新能源发电应当参与调频且提供足够的调频容量, 才能遏制系统频率特性的下降。新能源采取参考频率闭环控制, 是参与系统调频的较优方式。

时域数字仿真验证了上述结论。电力系统的频率特性将随着新能源的渗透率发生重大变化。高渗透率情况下, 新能源参与系统调频对于遏制系统频率特性的下降具有至关重要的作用。

参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).
- [2] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 974-984.
Wang Qi, Guo Yufeng, Wan Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 974-984(in Chinese).
- [3] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.
Ding Li, Qiao Ying, Lu Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2014, 38(14): 1-8(in Chinese).
- [4] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
Xue Yusheng, Lei Xing, Xue Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040(in Chinese).
- [5] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
Fu Yuan, Wang Yi, Zhang Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716(in Chinese).
- [6] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3462-3469.
Liu Jizhen, Yao Qi, Liu Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3462-3469(in Chinese).
- [7] Wang Ye, Delille G, Bayem H, et al. High wind power penetration in isolated power systems: assessment of wind inertial and primary frequency responses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2412-2420.
- [8] Ramasubramanian D, Vittal V, Undrill J M. Transient stability analysis of an all converter interfaced generation WECC system[C]//Proceedings of 2016 Power Systems Computation Conference. Genoa, Italy: IEEE, 2016: 1-7.
- [9] Kroposki B, Johnson B, Zhang Yingchen, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [10] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
Li Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [11] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [12] Shu Yinbiao, Chen Guoping, Yu Zhao, et al. Characteristic analysis of UHVAC/DC hybrid power grids and construction of power system protection[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 325-333.
- [13] Essential Reliability Services Task Force. Essential reliability services task force measures framework report [R]. Atlanta: The North American Electric Reliability Corporation, 2015.
- [14] Yan Ruifeng, Nahid-Al-Masood, Saha T K, et al. The anatomy of the 2016 south Australia blackout: a catastrophic event in a high renewable network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5374-5388.
- [15] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 395-428.
- [16] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 60-90.
Hu Shousong. Principle of automatic control[M]. Beijing: Science Press, 2007: 60-90(in Chinese).
- [17] Yazdani A, Iravani R. Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2010: 70-114.



张剑云

在线出版日期: 2020-03-19。

收稿日期: 2019-08-13。

作者简介:

张剑云(1978), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, zhang-jianyun@sgcc.com.cn;

李明节(1963), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、清洁能源并网。

(责任编辑 李泽荣)

Analysis of the Frequency Characteristic of the Power Systems Highly Penetrated by New Energy Generation

ZHANG Jianyun, LI Mingjie
(National Power Dispatching Center)

KEY WORDS: new energy; high penetration; frequency characteristics; steady state error of frequency; dynamic frequency response characteristic; frequency control

With the rapid development of wind farms and photovoltaic plants, the future power systems might experience the decline of fundamental frequency characteristics due to the severe reduction of power supply of thermal and hydropower plants. In order to study such decline, the frequency model of the power system highly penetrated by new energy is simplified and aggregated, as shown in Fig. 1.

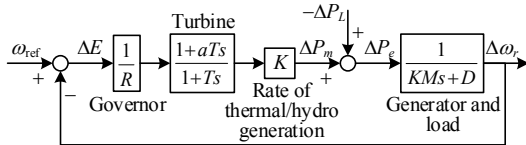


Fig. 1 Simplified and aggregated frequency model of power system highly penetrated by new energy generation

Two transfer functions about frequency response are focused as follows:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{\Delta E}{\Delta \omega_{ref}} \\ G_2(s) = \frac{-\Delta E}{\Delta P_L} \end{cases} \quad (1)$$

One is due to the change of frequency reference, the other is due to the change of power. The corresponding steady state errors (SSEs) can be obtained as:

$$\begin{cases} E_1 = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} G_1(s) = \frac{RD}{RD+K} \\ E_2 = -\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} G_2(s) = \frac{R}{RD+K} \end{cases} \quad (2)$$

When K decreases from 1 to 0, the astonishing increase in both E_1 and E_2 indicates the alarming decline of static frequency characteristics for a highly penetrated power system.

The dynamic frequency response characteristic (DFRC) of the highly penetrated power system is also defined based on inverse Laplace transformation as:

$$\beta_d \triangleq \frac{\Delta P_L}{-\Delta E(t_p)} = \frac{1}{E_2(1+\sigma\%)} = \frac{RD+K}{R(1+\sigma\%)} \quad (3)$$

which extends the traditional frequency response characteristic.

The dynamic frequency response is

$$\beta_d = \frac{1}{E_2(1+\sigma\%)} > \frac{0.1(\text{pu})}{0.02(\text{pu})} \quad (4)$$

Requires

$$K > 5R(1+\sigma\% - \frac{D}{5}) \approx 5R(1+\sigma_0\% - \frac{D}{5}) \quad (5)$$

which estimates the upper limit of the proportion of new energy generation.

Assuming that the capacity of frequency control provided by the new energy generation is enough, two schemes of frequency control of new energy generation are introduced and compared. The difference in the SSEs showed that the scheme via frequency reference closed-loop is better than the scheme via power closed-loop.

Finally time domain digital simulations are performed to verify the proposed conclusions and to reveal the trend of frequency characteristics of future power systems. Fig. 2 shows that frequency control provided by the new energy generation is more and more important with decreasing thermal/hydro generation.

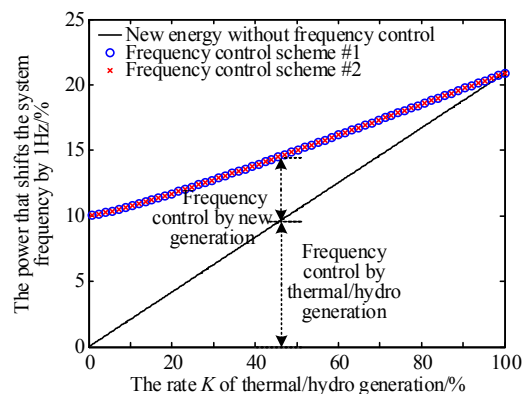


Fig. 2 Dynamic frequency response characteristics of power systems highly penetrated by new energy generation with different K