



同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用

曹炜¹✉ 张甜¹✉ 傅业盛²✉ 姚颖蓓² 陈思远¹

1. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 200090 ; 2. 国家电网公司华东分部, 上海市 200120

最近更新 : 2020-02-11 DOI : 10.7500/AEPS20190429015

全文

图表

参考文献

作者

出版信息

EN

引

目录 contents

摘要

关键词

0 引言

1 同步调相机惯性响应原理及与同步发电机的相互作用

2 国外电网同步惯性水平评估

- 1) SNSP
- 2) 系统 n 个小时内惯性

摘要

随着新能源和高压直流输电等非同步电源的增多, 电网同步惯量降低, 进而带来电力系统频率特性的显著变化。同步调相机作为同步机具备惯性响应, 可为系统提供短时频率支撑。文中首先介绍了同步调相机惯性响应原理及与同步发电机的相互作用。然后, 以同步调相机的惯性响应应用为切入点, 梳理了国外电网在改善电网惯性响应和频率特性方面所做的工作, 包括电网同步惯性水平、提高同步惯量的措施、同步惯性对同步电网频率响应的影响等方面。最后, 结合国外电网研究经验, 分析了华东电网是否有必要应用同步调相机增强电力系统频率支撑, 并提出了相关建议。

关键词

同步调相机; 惯性响应; 频率支撑; 非同步发电

0 引言

同步调相机在电网中的应用经过20世纪八九十年代的沉寂后, 在2010年前后开始进入新的活跃期。国外陆续有一些新能源接入比例较高的小型同步系统、与主网弱交流联系的小系统、海岛供电系统使用同步调相机^[1,2,3,4,5,6], 例如, 加拿大纽芬兰使用高惯量同步调相机(一般同步调相机惯性时间常数 $H=1.25$ s, 本例中 $H=7.84$ s), 不但为系统提供无功支撑, 还增加了系统惯量及短路容量^[1,2]; 英国电网(英国电网是一个独立的同步电网, 通过直流联络线与周边国家电网相连)也预计于2021年在尼尔斯顿完成混合型同步调相机的安装, 该项目旨在充分发挥同步调相机增加系统惯量、短路容量以及具有较高过流能力等方面的优势^[3]; 意大利电网在撒丁岛科德罗佳诺斯变电站装设了2台250 Mvar级同步调相机, 增加系统惯量的同时, 提高了输电网的运行灵活性^[4]。

从2010年以来国外同步调相机的一系列应用实践看, 同步调相机在现代电网中不再仅是一个提供无功功率、电压补偿的设备, 它在改善系统频率特性、提高系统频率支撑能力方面对某些低惯量系统更具吸引力。

由于中国目前的电力系统还没完全市场化运营,在部分电网中尽管新能源接入比例较高,但因为采用了常规同步发电机高旋转备用的运行策略应对风电、光伏等可再生能源的间歇性和不确定性(虽然这种策略难以兼顾经济性^[7,8]),加之中国电网规模较大(例如,目前华东电网装机规模为英国电网的3倍,最大负荷是英国电网的5倍,但新能源接入容量却只有英国电网的1.2倍),使得新能源所带来的系统惯量降低问题还未凸显。正因为如此,中国国家电网目前部署的新一代同步调相机,主要装设在直流换流站的交流侧,用来为交流系统提供紧急无功支撑、提高系统电压稳定性、降低直流换相失败概率等^[9,10],并没有考虑用其增大系统同步惯量。

但中国部分电网(例如华东电网)高压直流输电功率馈入比例较高,而电网的旋转备用并不随直流输电总馈入容量的增加而增加。综上所述,随着新能源和高压直流输电等非同步电源的发展和电力市场化的推进,中国的电力系统惯量出现下降趋势,需要对系统频率特性和频率稳定性给予更多关注。

随着能源转型的推进,世界范围内常规同步发电机特别是燃煤机组容量份额有逐渐减少的趋势。德国计划2030年之前关停2/3的燃煤机组,2038年彻底结束燃煤机组发电^[11]。与中国部分电网采用常规同步发电机高旋转备用的运行策略不同,国外一些电网更倾向于通过改造燃煤机组增加其运行灵活性^[12],燃气机组替代燃煤机组^[13],增加系统辅助服务种类^[14],提高辅助服务收费标准^[15],在日前市场的基础上增设日内市场^[16]等措施提高系统对风电、光伏等间歇性可再生能源的接纳能力。目前风电、光伏的超短期(4 h)预测精度已经较高,在日内市场中的使用可以减小短期运行备用(包括旋转备用),提高系统可再生能源接纳能力。国外这些做法在保证电网安全运行的同时,有利于保证优质燃煤、燃气机组的运营收益,促进可再生能源的健康发展,同时也比中国更早经历系统惯量降低过程和随之带来的问题。据2016年澳大利亚南澳电网“9·28”大停电^[17]、2019年英国“8·9”大停电^[18]的相关资料,电力系统惯量较低是引发前述事故的潜在诱因之一,给新形势下的电网频率安全问题敲响了警钟。近年来国外电网开始广泛关注系统惯性问题^[19,20,21,22,23,24,25]。

本文以同步调相机的惯性响应应用为切入点,梳理国外电网在改善电网惯性响应和频率特性方面所做的工作(包括但不限于应用同步调相机),然后针对华东电网的运行实际,提出相关建议。

1 同步调相机惯性响应原理及与同步发电机的相互作用

电力系统的频率是由其中众多的同步机转子转速共同决定。

当系统中出现任何形式的扰动时,由于同步机转子具有转动惯量和转子绕组磁链守恒,同步机等效电势的大小和相位都不突变,即包括同步调相机在内的所有同步机都具有电压源特性。该特性决定了当系统中出现扰动时,例如,当直流输电闭锁引起受端系统有功功率不平衡时,功率缺额将按与扰动点到各同步机的电气距离的共轭成反比,自动通过电网络即时传导分配到具有电压源特性的同步机,使同步机的输出电磁功率(对应作用在转子轴上的阻力矩)快速增加,而此时原动机功率(对应作用在转子轴上的动力矩)还没变化,根据同步机转子运动方

程（如式(1)所示），同步机转速下降。该过程即为同步机惯性响应。同步机惯量越小，扰动后其初始频率变化率（rate of change of frequency, RoCoF）越大，转速或系统频率下降越快。

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_N}{2H}(P_T - P_e) \quad (1)$$

式中： f 为机组电气转速或系统频率； f_N 为机组额定电气转速或系统额定频率； H 为机组惯性时间常数或系统等效惯性时间常数； P_T 为原动机功率； P_e 为同步机输出电磁功率。

同步调相机作为同步机的一种，像同步发电机一样遵循磁链守恒并具备惯性响应，即同步调相机也像同步发电机一样具有大小和相位不突变的电压源特性，这决定了系统的部分功率缺额也会通过电网络即时传导给同步调相机。对于同步调相机而言，式(1)中原动机功率 P_T 为零；若忽略其运行中的摩擦损耗，电磁功率 P_e 在稳态时也为零。但在电网扰动的暂态过程中，同步调相机将和同步发电机一起承担功率扰动，即 $P_e \neq 0$ ，同步调相机出于其惯性本性分担了系统的功率扰动。同步调相机在电网功率扰动下的机电暂态电磁功率变化情况（忽略摩擦损耗时的机电暂态仿真结果）见附录A图A1。

当系统发生功率缺额扰动时，同步调相机和发电机都将增加电磁功率输出，导致其转速下降。由于发电机组的原动机调速系统的作用，即频率的一次调节作用，发电机转速下降到一定程度（越过死区）后会增加原动机功率，使转速下降减缓甚至转速回升。同步调相机没有原动机系统，不具备频率的一次调节能力，这样随着时间的推移，同步调相机的转速将低于发电机转速，导致发电机电势相位逐渐超前于调相机电势相位。根据电网络特性，有功功率从相位超前处流向相位滞后处。因此随着时间推移，同步调相机输出的电磁功率将下降，自动转移给发电机，最终由发电机承担，忽略摩擦损耗，到稳态时同步调相机输出的电磁功率复归于零。总之，同步调相机的惯性响应增加了系统整体惯量，虽然不影响扰动后系统的稳态频率，但影响扰动后的频率动态，体现为减小系统频率初始变化率，配合系统频率的一次调节作用，一定程度上延迟了频率最低点到来，在功率缺额大、一次调频容量还没有来得及调出时，防止系统频率短时下降至低频减载第一轮动作值^[19]，如图1所示。

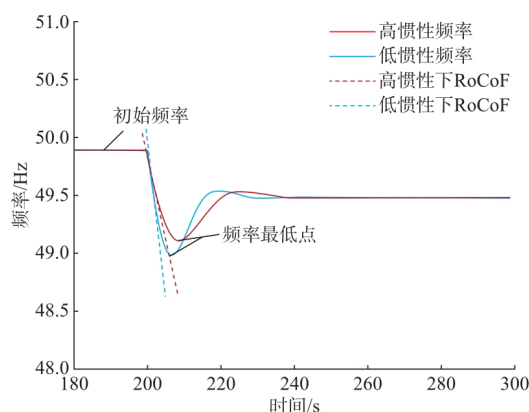


图1 惯性对电力系统频率特性的影响

Fig.1 Impact of inertia on frequency characteristics of power system

综上所述，同步调相机由于其具有惯性，可以和发电机一起自动、及时分担电网扰动，系统中加装同步调相机，相当于增大系统等值同步惯性，有利于改善系统频率动态响应和促进系统稳定运行。

2 国外电网同步惯性水平评估

国外电网判断系统同步惯性水平的指标主要有非同步发电瞬时渗透率 (SNSP)、惯性时间常数 H 、系统同步转动动能 $E_{k,sys}$ 等。部分同步电网(爱尔兰电网、北欧电网、英国电网等)已应用了相应指标评估及预测系统惯性水平。

1) SNSP

SNSP定义为系统非同步电源出力与系统总负荷的比^[20]，即

$$R_{SNSP} = \frac{P_{NG} + P_{import}}{P_{load} + P_{export}} \times 100\%$$

(2)

式中： P_{NG} 为本地新能源发电功率； P_{import} 为直流输电馈入功率； P_{load} 为本地负荷功率； P_{export} 为交直流输电送出功率。

爱尔兰电网基于其2020年电网运行规划(如附录A表A1所示)，对63个场景进行了时域仿真（其他37个场景因无法确保负荷最小时系统功率平衡，故不予研究，如图2（a）和（b）中灰色区域所示）得出在不同SNSP下系统惯性水平对系统频率特性的影响(见图2)^[20,24,26,27]。该电网最高电压等级为 400 kV（爱尔兰部分）和275 kV（北爱尔兰部分）^[28]。各场景中的传统同步发电机开机容量遵从经济理性假设，当系统SNSP增加时，传统同步机开机数量相应减少（如附录A图A2^[26]所示）。施加的功率扰动考虑了风电因系统短路故障期间电压下降引起的出力下降在故障清除后不能及时恢复，叠加外来直流闭锁损失的功率。

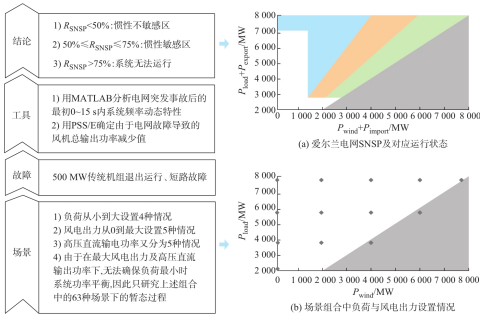


图2 爱尔兰SNSP研究概况

Fig.2 Research on SNSP in Ireland

对于爱尔兰电网的研究，得到以下重要结论。

SNSP小于50%时(图2 (a)中的蓝色区域)：系统频率特性对同步惯量的变化不敏感，即在该区域内无须通过增大同步惯量改善电网动态频率特性。图中， P_{wind} 为风电馈入功率。

SNSP在50%~75%之间(图2 (a)中的橙色区域)：系统频率特性对同步惯量的变化敏感，此时电网有必要通过采取增大同步惯量(例如，加装同步调相机，新能源发电、直流输电或静止无功发生器(SVG)提供电压源型虚拟惯量等)和快速频率响应(例如，新能源发电、直流输电或SVG以电流源型虚拟惯量运行等)等措施改善电网动态频率响应性能。

SNSP大于75%时(图2 (a)中的绿色区域)：系统在目前可以预见的技术条件下不能稳定运行。

另外，欧洲输电商联盟(ENTSO-E)对经济发达国家部分同步电网惯性水平开展了问卷调查。本文根据该次问卷中的相关数据，采用式(2)计算了相关电网的SNSP，参照爱尔兰惯性研究(如图2所示)，可大致推论目前大部分同步电网无须考虑系统惯性问题，但爱尔兰电网、英国电网等小型同步电网均已处于惯性敏感状态(欧洲电网是大规模多国互联电网，由欧洲大陆电网、北欧电网、爱尔兰电网、英国电网、波罗的海电网5个同步电网通过直流线相连，此外还有冰岛和塞浦路斯2个独立系统^[16,29])。

2) 系统 n 个小时内惯性时间常数平均值 H_{ave}

H_{ave} 定义为 n 个小时内每小时惯性时间常数 $H_{\text{ave},t}$ 之和与计算小时数 n 之比^[21,30,31]，即

$$H_{\text{ave}} = \frac{\sum_{t=1}^n H_{\text{ave},t}}{n} \quad (3)$$

$$H_{\text{ave},t} = \frac{E_{\text{k,sys}}}{S_{\text{sys}}} \quad (4)$$

$$E_{\text{k,sys}} = \sum_{j=1}^M \frac{P_j H_j}{k_j \cos \phi_j} \quad (5)$$

$$S_{\text{sys}} = \sum_{j=1}^M \frac{P_j}{k_j \cos \phi_j} \quad (6)$$

式中： S_{sys} 为系统总装机(包括非同步发电机组)容量之和； M 为单位小时内系统在线机组种类数； P_j 为单位小时内各类机组出力； H_j 为各类机组惯性时间常数平均值； k_j 为单位小时内各类机组出力与其额定容量之比； $\cos \phi_j$ 为各类机组功率因数。

欧洲输电商联盟基于 H_{ave} 指标对2030年欧洲电网惯性水平作了预测，如表1 [21]所示，其中英国电网、爱尔兰电网等小同步电网惯量被认为“极低”，将逼近系统运行极限。

表1 2030年欧洲低惯量电网惯性水平预测
Table 1 Prediction of inertia level of low inertia grid in European in 2030

地区		H_{ave} /s	
		1 a中50%的时间内	1 a中90%的时间内
欧洲大陆电网	希腊	0.6	1.4
	德国	2.4	0.9
	意大利	2.6	1.6
	西班牙	2.9	1.7
	葡萄牙	2.9	2.0
北欧电网	丹麦	1.1	1.1
爱尔兰电网	爱尔兰	2.9	0.6
	北爱尔兰	0.7	0.4
英国电网	英国	2.1	0.7

注： $H_{ave} >4\text{ s}$ ，惯性充足； $3\text{ s} < H_{ave} < 4\text{ s}$ ，惯性一般； $2\text{ s} < H_{ave} < 3\text{ s}$ ，惯性较低； $H_{ave} < 2\text{ s}$ ，惯性严重不足。

3) 系统同步转动动能 $E_{k,sys}$

$E_{k,sys}$ 定义为系统中每台同步机转动动能 $E_{k,sys,i}$ 之和[22]，即

$$E_{k,sys} = \sum_{i=1}^N E_{k,sys,i}$$

(7)

$$E_{k,sys,i} = S_{ni}H_i$$

(8)

式中： S_{ni} 为每台同步机组的额定视在功率； H_i 为每台同步机组的惯性时间常数； N 为系统的同步机台数。

北欧电网在其数据采集与监控/能量管理系统（SCADA/EMS）中加入了定期检测 $E_{k,sys}$ 功能，并设置了最小转动动能作为惯性指标警示值，用来评估系统在该时期内的惯性水平以及对短期惯性水平做出预测。基于2020年北欧电网装

机规划，北欧电网对其2020年转动动能进行了预测，预测结果表明2020年北欧电网将进入低惯量状态^[22]。

除了定期检测 $E_{k,sys}$ ，英国电网对实时监测的 $E_{k,sys}$ 进行了相关研究，并于2017年10月首次实时监测 $E_{k,sys}$ 试验成功，监测结果如图3^[23]所示。其中，红色曲线、黄色曲线为参照2003年英国电网发生大型频率事故做出的预评估警示值，蓝色曲线为电网动能实时监测量。由图中曲线对比可知，在该试验期间，电网实时动能保持在最低标准以上，但在某些时间点两者相差不大，系统动能部分时刻已处于临界状态。基于实时监测系统动能，该系统采用了根据系统动能的缺乏程度来关停无机械惯量的风机和直流输电馈入、开启更多同步发电机以增加系统惯量，同时依据即时系统惯量来采购和安排一次频率响应服务^[32]。

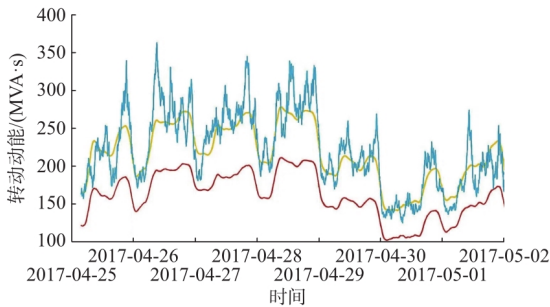


图3 2017年英国电网系统2 h移动平均动能

Fig.3 Average kinetic energy of 2 hour moving for British power grid in 2017

3 同步惯性对同步电网频率响应的影响

目前新能源和直流输电使系统惯量降低对大型同步电网和小型同步电网频率响应带来的影响有较大差别。

1) 同步惯性对小型同步电网频率响应的影响

小型同步电网(例如爱尔兰电网、英国电网)系统体量小，绝对量较小的新能源发电和直流输电就容易占较大的比例，从而使得其SNSP处于同步惯性敏感区，即同步惯量降低对小型同步电网频率响应的影响比较明显，如图1所示。

2) 同步惯性对大型同步电网频率响应的影响

在大型同步电网中，虽然新能源发电和直流输电绝对量较大，但系统体量也大，所以新能源发电和直流输电所占比例还是相对较低，从而使得其SNSP仍处于同步惯性不敏感区，即同步惯量降低对大同步电网频率响应的影响并不明显，美国西部互联系统(WECC)和中国东北电网的相关研究^[33,34]结果如附录A图A3和图A4所示，都属于这种情况。

通过适当设计控制系统，风机、光伏、储能、直流输电等也被认为可以向系统提供惯性或快速频率响应^[35,36,37,38,39]。文献^[35]研究了风机虚拟惯性和快速频率响应对中国某大型受端电网频率特性的影响，由该项研究的仿真结果

(如图4所示)判断,在该电网严重功率缺额事故中,采用容量为12 000 MW的风机和不采用虚拟惯性对系统暂态频率响应特性,特别是初始频率下降速度和到达频率低点的影响很小。文献[35]认为对于该大型受端电网,系统惯量相对比较充裕,此时通过风机等非传统电源增加虚拟同步惯量只是锦上添花而已,且过大的惯量还将使得同样时间内系统的频率跌落幅度变小,从而影响系统内机组一次调频功率的调出,反而不利于系统频率的恢复,因此当发生故障时,该同步电网更需要的是风机等非传统电源的快速一次调频能力。可见,这项研究的结果与前述2项研究的结果相吻合。

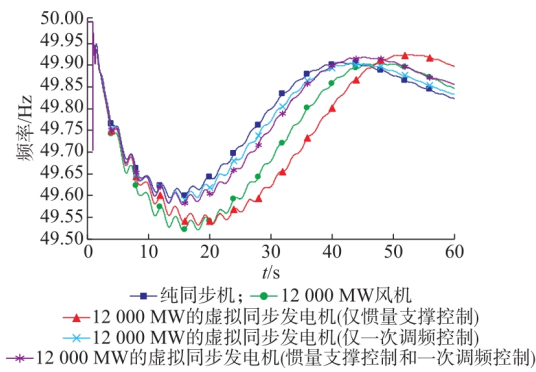


图4 大电网严重功率缺额事故中虚拟同步发电机不同控制功能作用下系统动态频率曲线比较

Fig.4 Comparison of system dynamic frequency curves corresponding to different control functions of virtual synchronous generator with serious active power shortage contingency in a large power grid

4 国外电网中提高同步惯量的措施

欧洲输电商联盟针对系统惯量降低问题总结了目前世界范围内已应用的措施[1,2,4,5,6,22,40],如表2所示,主要有增加转动动能(加装同步调相机、水轮机作同步调相机运行)、设置系统运行极限、增设相关辅助服务等措施。

表2 国外电网针对惯量降低已采用的措施

Table 2 Applied measures for foreign power grid with reduced inertia

已应用的措施	实施电网
加装同步调相机	韩国济州岛电网、英国尼尔斯顿电网(建设中)、加拿大纽芬兰电网、意大利撒丁电网、北欧电网
水轮机作同步调相机运行	澳洲塔斯马尼亚电网、美国加州北部电网
增加运行备用	新西兰电网、英国电网、美国得克萨斯州电网、澳洲塔斯马尼亚电网

已应用的措施		实施电网
设置系统运行极限	设置最小转动动能	爱尔兰电网
	限制弱交流联系的系统间交换功率	澳洲部分区域电网
	设置RoCoF约束	南澳州电网、英国电网
	限制低惯性系统中	
	高压直流输电的最大输入量	加拿大魁北克电网
	设置常规电源开机数量下限	南澳州电网
使水电机组或火电机组输出功率最低		丹麦法罗群岛电网、澳洲塔斯马尼亚电网
将新接入的同步机组的机组惯性列为生产指标之一		英国电网、北欧电网、爱尔兰电网
针对惯量降低制定相应的电网运行规定		加拿大魁北克电网

5 国外电网中用同步调相机提高同步惯量的实际应用案例

目前国外电网中针对系统惯量下降而应用同步调相机的案例多出现于较小的同步电网、孤岛电网^[1,2,3,4,5,6,22,40]，如英国电网、韩国济州岛电网、加拿大纽芬兰电网等，见附录A表A2。

其中，加拿大纽芬兰电网为提高同步调相机惯性支撑，研制并在圣约翰斯市应用了大容量、高惯量同步调相机，其惯性时间常数 H 高达7.84 s，是普通同步调相机惯性时间常数的6~7倍^[1,2]。

6 华东电网惯性水平和同步调相机应用情况

6.1 华东电网的惯性水平

2018年华东电网夏季高峰系统惯性时间常数 T 约为7 s($H=T/2$ ， H 对应为3.5 s)，参照欧洲输电商联盟的评估标准(见表1 注释)，可认为惯性水平一般。考虑到近年来华东电网新能源机组和直流馈入增速较大，本文基于2016—2025年数据估算了华东电网类SNSP变化情况(见表3)。其中，类SNSP与前文所述

SNSP的区别是：用新能源机组装机容量的某个百分比和高压直流输电额定容量之和代替其实际出力，设最小负荷系数为0.65，分别计算年度最大、最小负荷2种情况下的SNSP值。根据文献[20]对SNSP的定义，系统的开机容量对SNSP的取值没有影响。但系统频率响应特性不仅取决于SNSP，还和包括开机容量在内的诸多其他因素有关。为了保证电网运行安全，华东电网年度最大负荷时的开机容量是其1.02倍。因为网内燃机较少，调峰主要靠煤电，年度最小负荷时，为适应较大的日峰谷差，开机容量大于2倍的最小负荷。如果华东未来能够对煤电机组进行运行灵活性改造，并且增加燃气机组，最小负荷在开机时有望降低。

表3 华东电网电源、负荷及惯性指标类SNSP变化情况

Table 3 Variation of inertia index for source, load and SNSP in East China power grid

时间	最大负荷/MW	新能源机组装机容量/MW	高压直流额定容量/MW	新能源出力率为40%时类SNSP/%	新能源出力率为10%时类SNSP/%
2016	253 960	22 400	39 760	19.2~29.5	24.0~31.0
2017	262 840	34 620	57 760	27.2~41.8	35.0~51.0
2018	299 000	41 010	69 760	28.8~44.3	37.0~51.0
2020 (预测)	319 700	69 300	69 800	30.5~46.9	43.5~61.0
2025 (预测)	390 000	107 350	101 800	37.1~57.0	53.6~81.0

由表3中数据可知，华东电网自2016年以来，类SNSP持续增加，其中2016—2017年该比例增幅较大，随后增速明显放缓。若新能源出力率为40%，2018年华东电网类SNSP为28.8%~44.3%，预测2020年该比例将达到30.5%~46.9%，2025年将达到37.1%~57.0%。参考爱尔兰惯性研究，华东电网虽然目前无须考虑系统惯性问题，但从长远考虑，新能源机组出力及高压直流输送容量会逐渐增大，预测2025年有可能会逼近甚至进入所谓（爱尔兰电网研究中划定的）的惯性敏感区。但未来如果接近年度最小负荷时还能留有较高的旋转备用，则只是逼近或进入爱尔兰电网研究中的惯性敏感区，华东电网是否会进入其真正的惯性敏感区还取决于开机容量、机组组合、需要考虑的最严重扰动、扰动序列、电网结构等，应结合规划进行专题仿真研究。综合各方面因素，预测华东电网惯性敏感区对应的SNSP数值可能会高于爱尔兰电网。所以，到2025年华东电网仍较有可能还未进入其真正的惯性敏感区

上海电网是华东电网的一部分，2017年度最高直流馈入日，类SNSP为65.3%~66.8%(如附录A表A3所示)，按最安全的方式开机惯性时间常数 T 可达4.2 s；按最经济的方式开机，惯性时间常数 T 只有2.5 s。以上数据对比欧洲经

验说明,如果上海电网失去华东电网的依托,将进入所谓的惯性敏感区,其惯性也将严重不足。考虑到上海电网与华东主网是强联系,和华东电网解列的可能性不大,但其中的崇明长兴电网与上海、江苏电网是弱联系。2017年崇明长兴系统合计类SNSP达到46.8%(如附录A表A4所示),其中崇明系统类SNSP已达到51%。2017年崇明电网没有主力同步机组运行,所以其几乎没有同步惯性,靠主网提供频率支撑,不能孤网运行。2018年新上主力机组后,惯性时间常数 T 约为9 s,虽然SNSP仍较大,但由于其主力机组容量较大,动能充足,有条件支撑孤网运行。

6.2 华东电网同步调相机应用情况

根据“十三五”规划,华东电网计划2019年底安装同步调相机总数达18台,容量为5 400 Mvar,用来提高换流母线在近区交流故障后的电压恢复能力,减少严重故障情况下的直流连续换相失败次数。

国外电网同步调相机除了应用于上述和中国类似的场景外,更多用来应对新能源发电及高压直流馈入功率过高而带来的系统同步惯量不足和短路容量不足的问题。与国外电网不同的是,华东电网短路电流水平较高,2018年上海电网、江苏电网加装同步调相机后,虽然系统电压稳定性得到一定程度的提高,直流换相失败概率得以降低,但加重了华东电网短路电流水平控制压力。因为同步调相机会在故障时向系统注入短路电流,其中一台300 Mvar级同步调相机对所接入母线的短路电流贡献约为1~1.2 kA^[7]。

通过将估算所得的华东电网SNSP、惯性时间常数 H 与国际经验对比,可推断目前阶段华东电网装设同步调相机虽然有助于增加动能,但5 400 Mvar的同步调相机即使全部投运,惯性时间常数也仅增加2%,再考虑到目前华东电网仍处于惯性不敏感区,同时考虑到华东电网短路电流水平较高,就增大系统同步惯量而言,现阶段华东电网没有使用同步调相机改善系统整体频率特性的需求。

而上海电网虽然目前已进入惯性敏感区,但由于与华东电网的强交流联系,与主网解列可能性较小,因此目前在上海电网中增加同步调相机的需求也较小。

7 总结与建议

7.1 总结

新能源发电及高压直流输电的发展使电网惯性水平直接受到影响,同步调相机作为增加系统惯量比较直接的方式,对增强电力系统频率支撑具有一定效果。本文综述了国外相关研究如下。

1) 欧洲电网(爱尔兰电网、北欧电网以及英国电网等)设定了惯性指标及警示值,用来监测系统惯性情况,避免由于系统惯量过低而使系统处于运行极限。主要有通过新能源发电出力计算SNSP、根据转动动能计算 n 小时内惯性时间常数平均值 H_{ave} 以及对系统转动动能进行定期检测及实时监测。

2) 目前世界范围内大部分地区没有出现明显的惯性水平不足问题,但英国、爱尔兰等欧洲小型同步电网惯性水平偏低。欧洲输电商联盟预测2030年欧洲电网中英国电网、爱尔兰电网等小同步电网惯量将“极低”,逼近系统运行极限。

3) 欧洲输电商联盟针对系统惯量降低问题进一步总结了目前世界范围内已应用的措施,主要有增加转动动能(加装同步调相机、发电机改作同步调相机运行)、设置系统运行极限、增设相关辅助服务等措施。其中,同步调相机是目前可直接提高系统惯性的有效方式,且较多应用于北美和欧洲的小型同步电网、海岛电网中。

华东电网短期内整体惯性水平尚可,近期没有应用同步调相机增大系统整体惯量的需求。

7.2 建议

1) 开展华东电网惯性指标及其敏感区研究

在华东电网越来越多的新能源接入和跨区直流输电的双重背景下,SNSP将逐年提高,若新能源出力按40%新能源装机容量计算,保守预测到2025年华东电网SNSP将达37.1%~57.0%,但什么样的同步惯性指标适合华东电网运行安全评价,建议结合华东电网实际进一步综合研究定义,并经过详细的仿真研究明确华东电网的惯性敏感区域,以便在做新能源远景规划时参考。

2) 在年度运行方式报告中明示年度惯性指标区间

在上述仿真研究的基础上选择2种或3种同步惯性指标,将其年度最低或最高值,例如SNSP的年度最高值,作为华东电网年度运行方式需要说明的重要指标,以此警示、推进电网居安思危,积极寻找传统同步电源被替代时的同步惯性来源,并积极开展系统同步惯性对系统频率支撑能力、系统稳定性的影响研究。

3) 在未来辅助服务市场中适时地将快速频率响应和同步惯性作为电网辅助服务之一,以促进风电、光伏、储能、直流输电等非传统电源根据电网稳定运行需要参与系统快速频率响应或提供虚拟同步惯性;如经进一步研究论证未来需要同步调相机,将同步惯性作为电网辅助服务之一也可解决同步调相机投资、运行、维护资金等问题。

4) 通过实际发生的大功率扰动事件研究符合实际的华东电网频率响应模型及参数

符合实际的电力系统频率响应模型是进行电网有功频率暂态过程研究的基础。近年中国在机组频率特性建模上已经做了很多工作,例如,通过现场试验确定原动机及其调速器模型及参数。但由于原动机水汽调节过程的复杂性,即使每台机组都采用经现场试验确定的模型及其参数,则其进行系统级仿真时所得的电网大功率缺额事件(如直流闭锁)下的频率动态也与实际录得的频率动态差别较大。因此建议通过华东电网中实际发生的功率缺额事件研究华东电网频率响应综合模型,以便更符合实际地评估或预测华东电网同步惯性的敏感区域及其关键指

标，对包括使用同步调相机在内的各种应对措施在改善系统频率特性、提升华东电网新能源接纳能力方面的作用进行有效定量仿真评估。

5) 摸查与主网弱联系的小系统中是否有必要采用同步调相机或采取其他措施提高其供电可靠性

华东电网有相当数量的小系统与主网弱交流联系，可排查这些小系统的惯性指标，研究是否有必要加装同步调相机或是否可以采用其他措施，使其在故障后的孤岛运行状态增加短路容量和系统惯量，提升这些电网的供电可靠性，提高该局部电网新能源的接纳能力。

6) 调研将由于政策原因需淘汰的传统汽轮机组改建为同步调相机的技术经济可行性与必要性

目前废弃的小机组场地有的被改为储能电站，同步调相机在改善系统频率特性方面具有储能电站不易替代的作用，从长远看应综合考虑改造方案。

7) 调研燃气轮机作同步调相机运行的技术经济可行性

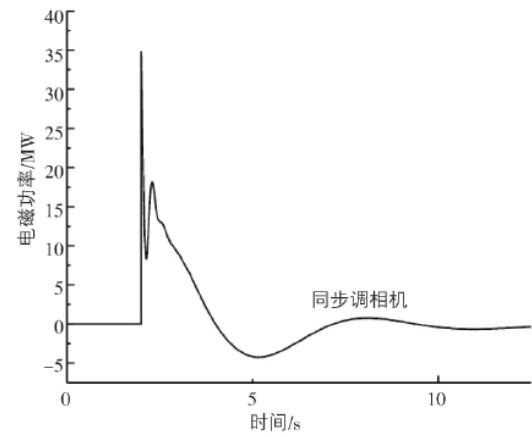
燃气轮机只需比较少的改造即可成为同步调相机，但如果燃气轮机可不经改动，维持最小功率运行，这样既可发挥同步调相机功能，又保留了其本身就具备的有功调节能力，会使电网运行更灵活更安全。

8) 在已研究明确华东电网惯性敏感区的前提下，对可能的未来电网进行进一步技术经济研究，提出改善未来电网的综合措施。

同步调相机可提高电压支撑能力、增加系统惯量，但也存在一些缺点，如提供较大短路电流（尤其对短路容量超标的电网），运行维护相对复杂。如前文所述，还有很多其他措施可以改善系统惯性水平、提高系统频率响应能力，包括使用已有同步发电机（其中水轮机作调相机运行提供动能是成熟的经济代价较低的技术）低功率运行，新能源、储能、直流输电等各种非传统电源参与快速频率响应或提供虚拟同步惯性等。建议综合对比各种可能的措施以确定未来电网同步惯量减少应对策略，为未来电网是否要保留传统电源及其保留传统电源的比例做前瞻性研究。

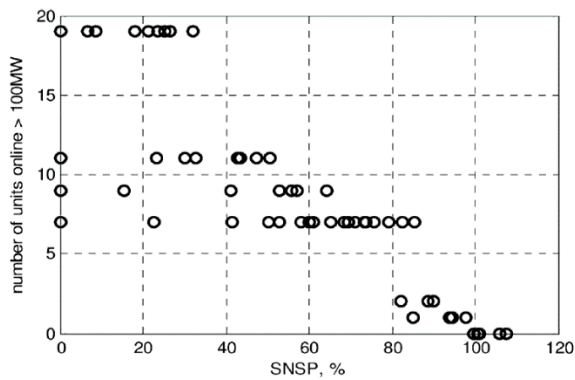
附录

附录A



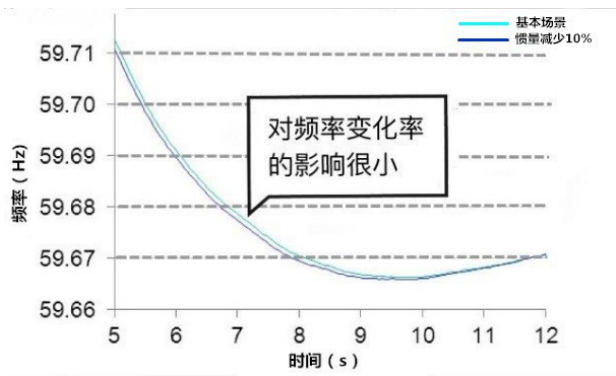
图A1 电网扰动中同步调相机的电磁功率暂态变化

Fig.A1 The transient electromagnetic power of a synchronous condenser subject to a power system disturbance



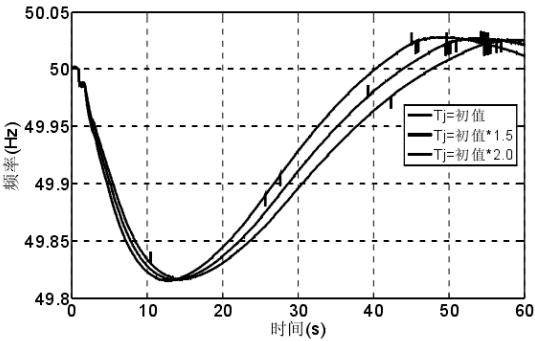
图A2 爱尔兰研究系统中电厂容量大于100 MW的传统发电机实际开机台数随SNSP变化趋势

Fig.A2 Number of conventional synchronous plant (>100 MW) online with respect to instantaneous SNSP



图A3 美国西部互联系统（WECC）发生扰动后不同惯量下系统频率特性曲线对比

Fig.A3 The comparison of the frequency characteristics for different inertia in the system of the Western Electric Coordinating Council



图A4 东北电网发生扰动后不同惯性时间常数下系统频率特性曲线对比

Fig.A4 The comparison of the frequency characteristics for different inertia time constant in the Northeast power grid

附录B

表B1 2020年爱尔兰电网运行规划

Table B1 Operational planning of Ireland grid for 2020

传统机组装机容量 (MW)	新能源机组装机容量 (MW)	HVDC额定容量 (MW)	最大负荷 (MW)	最小负荷 (MW)
8000	7500	1350	7800	2600

表B2 用同步调相机提高同步惯量应用案例

Table B2 The application case of improving inertia with synchronous condenser

时间	项目	项目描述	项目地点	主要解决的问题	同步调参
2008	VELCO	弱交流系统通过交直流与主网联系，内部电源较少[40]	美国	增加惯量；增加系统短路容量；低电压穿越；系统低阶谐波问题	4*+25/-1 同步调柜

时间	项目	项目描述	项目地点	主要解决的问题	同步调参
2008	Lower Churchill Project-DC1020-HVdc System Integration Study	加拿大拉布拉多省、纽芬兰省及新布伦瑞克省交流电网计划通过一条三端高压直流输电系统连接，为保证工程的可实施性，该项目旨在提供相关技术服务 ^[1]	加拿大纽芬兰	系统无功及惯性支撑不足；系统短路容量不足	加装2*300级高惯性相机；加作同步调行的燃气两台发电为142/-7同步调柜台发电机150/-69 I步调相机
	Lower Churchill Project - DC1210-HVdc Sensitivity Studies	针对加拿大拉布拉多省、纽芬兰省及新布伦瑞克省交流电网之间的三端高压直流输电系统投入运行后出现的问题展开后续完善工作 ^[2]	加拿大纽芬兰	系统惯量减少；由于频率衰减加速系统崩溃	加装3*150级高惯量相机

时间	项目	项目描述	项目地点	主要解决的问题	同步调参
2011	KEPCO	该岛为高压直流输电终端，该岛燃气轮机计划退出运行，同时增加海上风机 ^[5,6,22]	韩国济州岛	短路电流减少；系统惯量减少；最小负荷时风机渗透率预计达到80%	2*+50/-2
2016	撒丁岛多馈入高压直流输电系统	撒丁岛电网通过150kV电缆以及3条终端高压直流输电线路与科西嘉岛相连 ^[4]	意大利撒丁岛	系统惯量降低，短路容量低，输电网灵活性差	2*250MVA
2017	凤凰城项目	混合发电使系统稳定性下降，为英国用户带来风险 ^[3]	英国尼尔斯顿	系统惯量减少；短路容量低；电能质量问题；电压控制问题	混合型同步机（正在中）

表B3 2017年上海电网直流馈入最高日惯性指标

Table B3 The inertia index when the HVDC reached the maximum for Shanghai grid in 2017

时段	交流输出功率 (MW)	本地负荷 (MW)	新能源机组发电功率 (MW)	HVDC输送功率 (MW)	类SNS (%)
高峰	1235	18368	133	12670	65.31
腰荷	2816	16381	141	12679	66.26
低谷	6581	12965	289	12662	66.78

表B4 2017年崇明、长兴电网惯性指标

Table B4 The inertia index of the Chongming and Changxing grid in 2017

电网	最大负荷 (MW)	新能源机组装机容量 (MW)	(100%新能源装机) 类 SNSP (%)
崇明	437	223	51
长兴	188.2	68	36
合计	621.2	291	46.8

参考文献

1 Newfoundland and Labrador Hydro . The lower Churchill project-DC1020-HVdc system integration study[EB/OL]. [2018-09-22].
[https://assembly.nl.ca/business/electronicdocuments/MuskratFalls/CE-08\(R1\)-Public.pdf](https://assembly.nl.ca/business/electronicdocuments/MuskratFalls/CE-08(R1)-Public.pdf). [百度学术]

2 Nalcor Energy . The lower Churchill project-DC1210-HVdc sensitivity studies[EB/OL]. [2018-10-06].[http://www.pub.nl.ca/applications/MuskratFalls2011/files/exhibits/abridged/CE-10\(R1\)-Public.pdf](http://www.pub.nl.ca/applications/MuskratFalls2011/files/exhibits/abridged/CE-10(R1)-Public.pdf). [百度学术]

3 SP Energy Networks . System security and synchronous condenser[EB/OL]. [2018-09-17].
https://www.spenergynetworks.co.uk/userfiles/file/Phoenix_Report_Dec_2017.pdf. [百度学术]

4 GIULIO A D , GIANNUZZI G M , IULIANI V , et al . Increased grid performance using synchronous condensers in multi in-feed multi-terminal HVDC system[EB/OL]. [2018-10-11].
https://www.researchgate.net/publication/269140160_Increased_grid_performance_using_synchronous_condensers_in_multi_in-feed_multi-terminal_HVDC_system. [百度学术]

5 PAKR J W , PAKR Y H , MOON S I . Instantaneous wind power penetration in Jeju island[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA. [百度学术]

6 MARKEN P E , SKLIUTAS J P , SUNG P Y , et al . New synchronous condensers for Jeju island[C]// Power and Energy Society General Meeting , July 22-26, 2012, San Diego, USA. [百度学术]

- 7 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相. 考虑风电效益的风火互济系统旋转备用确定方式[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):16-21. [百度学术]
WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang. A method for determination of spinning reserve in wind-thermal power systems considering wind power benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 16-21. [百度学术]
- 8 谭忠富, 宋艺航, 张会娟, 等. 大规模风电与火电联合外送体系及其利润分配模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 63-70. [百度学术]
TAN Zhongfu, SONG Yihang, ZHANG Huijuan, et al. Joint delivery system of large-scale wind power and thermal power generation and its profit distribution model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 63-70. [百度学术]
- 9 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22):139-143. [百度学术]
ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 139-143. [百度学术]
- 10 赵一琰, 华文, 邓晖, 等. 调相机接入对浙江电网的影响研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(1):8-12. [百度学术]
ZHAO Yiyang, HUA Wen, DENG Hui, et al. Research on the impact of synchronous condenser on Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(1): 8-12. [百度学术]
- 11 GROLL S. Coal commission final report-assessment[EB/OL]. [2019-08-29]. <https://www.boell.de/en/2019/02/18/coal-commission-final-report-assessment>. [百度学术]
- 12 MILLS S. Combining solar power with coal-fired power plants or cofiring natural gas[J]. Clean Energy, 2018, 2(1): 1-9. [百度学术]
- 13 TODD F. Natural gas to play “the key role” in global transition to renewable energy, says expert[EB/OL]. [2019-08-29]. <https://www.nsenergybusiness.com/features/natural-gas-renewable-energy/>. [百度学术]
- 14 EIRGRID, SONI. DS3 system services protocol-volume capped arrangements DS3 system services implementation project [EB/OL]. [2019-08-28]. <http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/DS3-System-Services-Volume-Capped-Protocol-Document-draft-May-2019.pdf>. [百度学术]

- 15 EIRGRID , SONI . DS3 system services interim tariffs DECIS-I on paper DS3 system services implementation project[EB/OL]. [2019-08-28]. <http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/DS3-System-Services-Decision-Paper-on-Interim-Tariffs-FINAL.pdf>. [百度学术]

- 16 傅业盛, 桑姐, 曹炜, 等. 欧盟的REserviceS项目以及对我国风电及光伏参与电网调频的启示[J]. 电网技术, 2019, 43(2):613-621. [百度学术]
FU Yesheng, SANG Da, CAO Wei, et al . REserviceS project of EU and it's enlightenment to China's wind power and PV participation in grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 613-621. [百度学术]

- 17 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13):1-6. [百度学术]
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et, al . Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6. [百度学术]

- 18 National Grid ESO . Interim report into the low frequency demand disconnection (LFDD) following generator trips and frequency excursion on 9 August 2019[EB/OL].[2019-08-21].https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2019/08/incident_report_lfdd_-_summary_-_final.pdf. [百度学术]

- 19 NTNU-Trondheim . The need for inertia in the nordic power system[EB/OL]. [2018-09-12]. https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2368196/13251_FULLTEXT.pdf?sequence=1. [百度学术]

- 20 ANDREJ G . D5.1 onshore wind supporting the Irish grid—Ireland case study[EB/OL]. [2018-09-16]. <http://www.reservicesproject.eu/wp-content/uploads/D5.1-REserviceS-Ireland-case-study-Final.pdf> . [百度学术]

- 21 European Network of Transmission System Operators for Electricity . High penetration of power electronic interfaced power sources-guidance document for national implementation for network codes on grid connection [EB/OL]. [2018-09-14]. https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidanc-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic- interfaced-power-sources.pdf. [百度学术]

- 22 European Network of Transmission System Operators for Electricity .
Future system inertia 2 report[EB/OL]. [2018-09-17].
[https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/
SOC/Nordic/Nordic_report_Future_System_Inertia.pdf](https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/SOC/Nordic/Nordic_report_Future_System_Inertia.pdf). [百度学术]
- 23 PORTER K . Measuring grid inertia accurately will enable more efficient
frequency management [EB/OL]. [2018-09-13]. [http://watt-
logic.com/2017/10/12/inertia/](http://watt-logic.com/2017/10/12/inertia/). [百度学术]
- 24 O’SULLIVAN J . The impact of non-synchronous generation on system
inertia[EB/OL]. [2018-09-05]. [http://cigreireland.ie/wp-
content/uploads/2013/08/Session-2-The-Impact-of-Non-Synchronous-
Generation-on-System-Inertia.pdf](http://cigreireland.ie/wp-content/uploads/2013/08/Session-2-The-Impact-of-Non-Synchronous-Generation-on-System-Inertia.pdf). [百度学术]
- 25 NGUYEN H T , YANG G , NIELSEN A H , et al . Frequency stability
improvement of low inertia systems using synchronous condensers[C]//
IEEE International Conference on Smart Grid Communications ,
November 6-9, 2016, Sydney, Australia. [百度学术]
- 26 O’SULLIVAN J , ROGERS A , FLYNN D , et , al . Studying the
maximum instantaneous non-synchronous generation in an island
system—frequency stability challenges in Ireland[J]. IEEE Transactions
on Power Systems , 2014 , 29(6): 2943-2951. [百度学术]
- 27 EIRGRID , SONY . All island Tso facilitation of renewables
studies[EB/OL]. [2019-08-30]. [http://www.eirgridgroup.com/ site-files/
library/ EirGrid/ Facilitation-of-Renewables-Report.pdf](http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Facilitation-of-Renewables-Report.pdf). [百度学术]
- 28 CREIGHTON K , MCCLURE M , SKILLEN R , et , al . Increased wind
generation in Ireland and Northern Ireland and the impact on rate of
change of frequency [EB/OL]. [2019-08-28].
[http://www.eirgridprojects.com/site-
files/library/EirGrid/Increased%20Wind%20Generation%20in%20Ireland
%20and%20Northern%20Ireland%20and%20the%20Impact%20on%20
Rate%20of%20Change%20of%20 Frequency.pdf](http://www.eirgridprojects.com/site-files/library/EirGrid/Increased%20Wind%20Generation%20in%20Ireland%20and%20Northern%20Ireland%20and%20the%20Impact%20on%20Rate%20of%20Change%20of%20Frequency.pdf). [百度学术]
- 29 European Network of Transmission System Operators for Electricity .
ENTSO-E at a glance 2015[EB/OL]. [2018-08-15].
[https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSOE%20general%2
0publications/entsoe_at_a_glance_2015_web.pdf](https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSOE%20general%20publications/entsoe_at_a_glance_2015_web.pdf)
#search=entsoe%5Fat% 5Fa%5Fglance%5F2015%5 Fweb .
[百度学术]

- 30 PERSSON M , CHEN P . Kinetic energy estimation in the nordic system [C]// Power Systems Computation Conference, June 11-15, 2018 , Dublin, Ireland. [百度学术]
- 31 STATNETT F . Challenges and opportunities for the nordic power system[EB/OL]. [2018-09-24].
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/tki-toiminta/report-challenges-and-opportunities-for-the-nordic-power-system.pdf>.
[百度学术]
- 32 朱介北 , 洪启腾 .英国 2019.8.9 大断电事故全析[EB/OL]. [2019-08-20].
<http://www.solarpwr.cn/bencandy-61-45224.html>. [百度学术]
ZHU Jiebei , HONG Qiteng . The analysis of the backouts in the UK on 9 August 2019[EB/OL]. [2019-08-20].
<http://www.solarpwr.cn/bencandy-61-45224.html>. [百度学术]
- 33 MILLER N W , SHAO M , VENKATARAMAN S . Frequency response study[EB/OL]. [2018-09-08]. <http://www.caiso.com/documents/report-frequencyresponsestudy.pdf>. [百度学术]
- 34 蒋大伟 .大规模风电并网对系统频率影响分析[D].吉林：东北电力大学，2010. [百度学术]
JIANG Dawei . Analysis of the impact on power system frequency in respect of large-scale wind power integration into grid[D]. Jilin: Northeast Dianli University , 2010. [百度学术]
- 35 秦晓辉 , 苏丽宁 , 迟永宁 , 等 .大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J].电力系统自动化 , 2018 , 42(9):36-43.DOI:10.7500/AEPS20171122007 . [百度学术]
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al . Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43. DOI: 10.7500/AEPS20171122007 . [百度学术]
- 36 刘皓明 , 任秋业 , 张占奎 , 等 .双馈风机等效惯性时间常数计算及转差率反馈惯量控制策略[J].电力系统自动化 , 2018 , 42(17):49-57.DOI:10.7500/AEPS20171009001 . [百度学术]
LIU Haoming, REN Qiuye, ZHANG Zhankui, et al . Calculation of equivalent inertia time constant for doubly-fed induction generators and slip-feedback inertia control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 49-59. DOI: 10.7500/AEPS20171009001 . [百度学术]

- 37 WANG X , YUE M , MULJADI E . PV generation enhancement with a virtual inertia emulator to provide inertial response to the grid[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) , September 14-18 , 2014 , Pittsburgh , USA : 17-23. [\[百度学术\]](#)
- 38 胡安平 , 杨波 , 潘鹏鹏 , 等 .基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J]. 中国电机工程学报 , 2018 , 38(17):4999-5008. [\[百度学术\]](#)
HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al . Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999-5008. [\[百度学术\]](#)
- 39 张武其 , 吕洋 .向弱电网供电的VSC-HVDC系统的模拟惯量控制策略研究 [J].电力系统保护与控制 , 2016 , 44(6):104-110. [\[百度学术\]](#)
ZHANG Wuqi, LÜ Yang . Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110. [\[百度学术\]](#)
- 40 SKLIUTAS J , LAFOREST D , D'AQUILA R , et al . Next-generation synchronous condenser installation at the VELCO granite substation[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009 , Calgary, Canada. [\[百度学术\]](#)

copyright © 2018-2020