

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.2018.014

关于频率响应控制未来发展的思考

李卫东

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁省 大连市 116024)

On Frequency Response Control of Future Grid

LI Weidong

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning Province, China)

摘要: 特高压输电工程逐步推进导致单一元件故障所造成功率失衡数量不断增加, 可再生能源大规模接入导致常规机组容量占比持续降低, 频率稳定控制攻防两端此消彼长, 频率稳定问题凸显; 而不断丰富的源网荷侧频率响应控制手段需要更好地协调, 以充分发挥其控制效能从而提升频率稳定水平。通过频率响应控制视角下未来电网的结构与形态分析, 明确了频率响应控制资源需要精细化管理与控制, 指出需要开展动态视角下的频率响应运行调度和频率响应资源集中统一协调控制等理论的研究工作, 为频率响应调节资源的规划、计划与调度和多类主体参与频率响应控制提供参考, 从而提高系统整体频率响应能力, 提升大扰动下的频率稳定抵御能力。

关键词: 频率响应; 一次调频; 安全稳定控制; 频率稳定; 辅助服务; 频率控制; 广域控制; 新能源高渗透率

ABSTRACT: As the development of ultra-high voltage (UHV) AC and DC transmission system in China, the quantity of unbalanced power caused by a single element fault will continue to increase. The large-scale renewable energy integration will keep decreasing the capacity ratio of conventional thermal units. Of both ends on the floor in frequency response control, the “offense” will be strengthening while the “defense” be lessening, and the frequency stability have become outstanding. On the other hand, the ever-richer frequency response control measures on “source-grid-load” side should be coordinated better, to make full use of their control performance so as to improve frequency stability level. Through analyzing the structure and shape of future grid from the perspective of frequency

response control, it is clear that frequency response control resources need more refined management and control, and the relevant theory should be progressing with time. It is pointed out that the research of dispatch of frequency response from the dynamic perspectives and centralized and unified coordination and control of frequency response control measures should be developed. This will provide the references for planning, scheduling and dispatching of frequency response control measures and the participants of kinds of subject in frequency control. So, the frequency stability defense capacity will be reinforced with enhanced system frequency response control ability.

KEY WORDS: frequency response; primary frequency regulation; control of safety and stabilization; frequency stability; ancillary services; frequency control; wide area control; high penetration of renewable energy

0 引言

随着环境污染的日益严重和能源危机的不断加剧, 人类的能源利用问题凸显, 发展可再生能源是全球共识。按照 2050 年的各国规划蓝图, 欧洲力争实现 100% 可再生能源的电力系统, 美国要实现 80% 可再生能源的电力系统, 而中国将实现 60% 可再生能源的电力系统。因此, 人类能源利用将进入多能源时代: 核能、太阳能、氢能等将成为未来的主要能源来源。

我国新能源发展极为迅猛。迄今为止, 风电新增和累计装机容量均超美居世界第一, 光伏新增装机全球居首, 累计装机超德国成为全球第一^[1]。由于各省区能源资源禀赋差异显著, 远离

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51677018).

负荷中心的风光水能需要通过超远距离大容量输送。因此,我国未来将是特高压大电网与分布式微电网共同运行^[2]。

频率响应(frequency response)是阻止运行频率大幅波动,从而维护系统运行频率稳定的第一道主动控制防线(惯性为第一道防线,但在目前的频率控制中其为自主行为),对保证系统运行频率稳定至关重要^[3-5]。本文面对未来我国电力系统结构形态,对频率响应控制的发展趋势、存在的问题和相关研究工作进行了思考和讨论,以期对相关探索和研究提供参考。

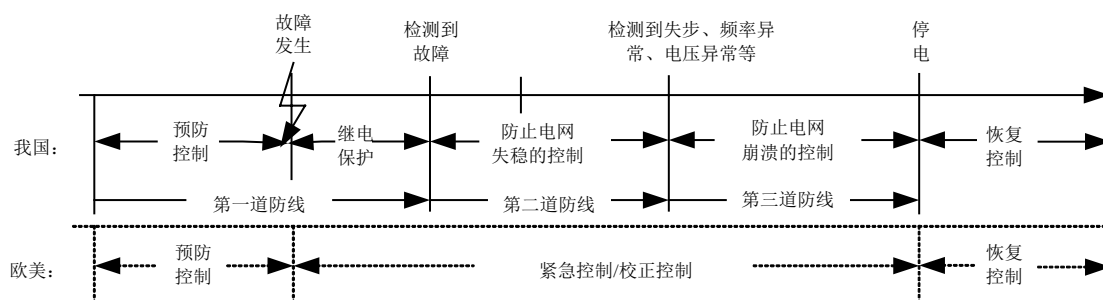


图1 电力系统安全稳定控制框架

Fig. 1 The control framework of security and stability of power system

在电力系统安全稳定控制体系中,预防控制用于在电力系统正常运行时保证电网安全性与充裕性,与继电保护共同组成电网第一道防线,为开环控制;防止电网失稳的控制是对预想的运行方式和故障存在的暂态稳定问题,由稳控装置依据控制决策表控制以保持系统的暂态稳定,属于第2道防线,为前馈控制;防止电网崩溃的控制是在检测到失步振荡、频率异常、电压异常等事故后采取的就地措施,用于防止系统崩溃,属于第3道防线,是反馈控制;恢复控制则是用于电力系统稳定破坏或崩溃后恢复系统充裕性。

与欧美国家采用的安稳控制框架相比,我国与其大体相似,但较为细致,只是在故障后控制措施分类方面略有不同,具体为将继电保护、防止电网失稳的控制和防止电网崩溃的控制统称为紧急控制或校正控制^[7-8]。

在频率稳定控制方面,电网正常运行以消除本地频差为控制目标,主要从预防和校正两个方面进行控制。其中,频率响应控制与自动发电控制、切机、切负荷、低频减载(高频切机)等措施

1 频率响应控制视角下未来电网的结构与形态

1.1 频率响应在安全稳定控制中的功能

大扰动下频率稳定控制问题属于大系统稳定控制范畴。我国电力系统运行中,根据运行经验、参考国外相关理论与实践,设计了适合我国电网实际运行情况的安全稳定控制框架,具体可划分为预防控制、防止电网失稳的控制、防止电网崩溃的控制和恢复控制4种控制方式,并将其与3道防线对应^[6],具体如图1所示。

一起构成校正控制,其作用的时间尺度为秒至数十秒。

1.2 电能平衡控制将成为主流服务

随着可再生能源机组容量占比的不断提升,火电等化石燃料机组容量占比将逐渐降低,风光水核等清洁能源将成为电能的主要来源;而随着输电、电力电子和通信等技术的不断发展,电力体制改革不断纵深^[9],主动负荷控制、储能(包括电动汽车)等技术将日渐成熟^[10-11],常规和新型种类发电(如燃气等)机组、主动负荷响应(如虚拟发电机、精准切负荷等)、储能设备和直流输电线路功率调制等手段,将成为频率响应控制的主要手段。

可再生能源生产边际成本的趋零特征,储能成本的持续降低和云储能^[12]的逐步兴起,电能(电力公司主服务)价格将会越来越低,甚至趋零;与此同时,由于输出功率可控的常规能源机组的逐步退出、清洁能源输出的不确定性等因素,电能平衡控制(电力公司辅助服务)价格将会越来越高,成为电能服务行业利润的主要来源。

因此，在未来特高压交直流混联电网逐渐成型、新能源机组成为主流、常规火电机组逐步退出、输电、电力电子和通信等技术快速发展、新技术不断涌现、电力市场日趋成熟的背景下，电能平衡控制服务将超越电能供给服务，从而成为电力公共服务事业中的主流。在此背景下，大扰动下电力系统频率响应控制将面临新的局面。

1.3 频率响应控制所面临的局面将更为紧张

“频率响应”又被称为“一次调频(primary frequency control)”，是电力系统中用以遏制和稳定频率的一种动作行为，主要由加装调速器的发电机组所提供频率响应、负荷频率响应(以电动机为主)，以及其他基于本地频差控制的相关设备所提供快速频率响应构成。该功能是针对有功功率的调整，其性能由有功功率频率响应特性^[13]衡量，描述了频率响应服务提供主体在系统运行频率偏离计划值时，自动调整自身输出或取用有功功率所表现出的特性。

频率响应的作用在不同系统运行状态下并不相同：1) 在大功率缺失下，迅速补充功率损失，对频率下降实施有效拦截，为后续较为缓慢调节手段(如自动发电控制、在线经济调度等)的投入赢得时间，从而更好地保证系统频率稳定，维护系统运行安全；2) 在较小功率波动下，一方面作为快速调节手段对频率波动进行迅速调节，从而提高频率质量，另一方面对于短暂的功率波动予以快速反应，避免二次调节进行无谓调节从而提高运行经济性。

由于大功率缺失下的频率控制关乎系统运行安全，在该情形下，若系统的频率响应能力满足要求，则小扰动下的频率响应则不成问题，因此，在系统运行中，一般是对大功率缺失下的频率响应能力做出明确规定。

频率响应控制的本质是在扰动后秒至分钟级时间尺度的有功功率平衡，目的是对频率的快速下降进行拦截，避免频率大幅减低至低频减载(高频切机)的启动阈值。该目的是否奏效取决于控制“攻防”两端的势力对比。“攻”对应于故障所导致的功率不平衡数量，“防”对应于故障前频率值、系统惯性和频率响应能力等3个主要因素。

在未来电网结构形态下，频率响应控制“攻防”两端将面临如下趋势。

“攻”侧，一方面，百万甚至千万千瓦级风电能源基地的清洁能源需要通过特高压交直流输电线路远距离输送，清洁高效的巨型火电和核电机组逐步代替了污染低效的小火电机组，因此，无论是输电线路还是火电机组出现故障(单一元件故障)所引起功率失衡数量将大幅增加；另一方面，相对较差的自然环境，加之直流线路积污速度较快，导致特高压输电线路直流单极闭锁故障率较高，因此，单一元件故障率亦将有所提升。

“防”侧，可再生能源装机容量和输出电量占比的逐步提升，将挤占常规火电机组的发电空间，导致常规机组并网数量不断减少，因此，系统惯性和频率响应能力将持续下降。在这种情况下，若不增加新的频率响应控制手段，则，系统惯性和频率响应能力的下降会使系统正常运行状态下的频率偏差将会整体加大，从而导致故障前频率处于低位(高位)的概率大幅上升，惯性下降会使故障后频率下降速率提升，频率响应能力下降会造成系统遏制频率下降的能力降低。这些因素综合在一起，将会增加低频减载或高频切机措施投入的风险。

综上所述，频率响应控制“攻防”两方面的此消彼长，使得未来频率响应控制所面临的局面将更为紧张，频率稳定问题将会十分严峻。

2 需要研究的问题

2.1 面向市场的频率响应精细化的管理

目前，频率响应作为辅助服务所实行的运行与管理机制，是电监会2006年底颁布的《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》、《发电厂并网运行管理规定》^[14-15]。随后，我国6个区域电网结合各自区域内电源、负荷和网络结构等实际情况，制定了相应的“两个细则”。

出于保证电力系统安全、稳定运行和维护电能质量等电网正常运行的控制需要，频率响应被定义为电网内相关主体必须无偿提供的基本辅助服务。在此机制下，频率响应服务和电能量捆绑在一起，由系统运行调度部门根据系统运行情况

按需调用。

如前述,随着频率响应“攻守”局面的日益紧张,即在频率响应能力供给与需求矛盾的日益突出的局面下,已有的常规机组所提供的频率响应能力将不能满足运行要求,需要专门提供该功能的服务主体。因此,需要建立新的市场化的频率响应辅助服务新机制,将频率响应辅助服务与电能主服务解捆,作为有偿服务。即,常规机组和其他能够提供频率响应服务的其他设备与手段一样通过参与频率响应辅助服务获取相关服务收入。

出于节约运行成本的考量,电网公司需要对系统运行频率响应能力需求进行更为精细化的管理,而相关机构亦会对频率响应调节资源的规划、计划与调度进行深入研究,为相关服务主体的投资与运行决策提供参考。

2.2 不同种类频率响应调节资源的精细化统一控制

目前在我国,频率响应的提供来源主要是常规的火电与水电机组,其控制模式为依据本地频差的分散自主控制。随着新的频率响应调节手段的不断成熟,频率响应服务的提供者将更为多元,相关设备的种类更为丰富。这些不同种类的控制手段,控制性能不一,控制依据也不相同,控制机制亦不一样。

大扰动下最受关注的是频率波动的最低点,因其决定低频减载的启动与否。从扰动发生到频率下降至最低点时间短暂,一般以秒计。频率响应的作用是在系统经受大功率扰动下频率快速下降时段迅速补充由于功率缺失的能量损失,对频率下降实施有效拦截,在避免低频减载启动的同时,为后续缓慢调节手段的投入赢得时间。

由于扰动后频率快速下降时间短暂,在此期间若能对各类频率响应手段进行合理调配与精确控制,则可提高频率响应的控制效果,从而避免低频减载的发生,更好地保证系统频率稳定,维护系统运行安全。

故障后的功率缺失偏差量在各频率响应元件间分配依据的是元件与故障点间的电气距离^[16]。靠近故障点的控制元件由于被分配数量较大,其

所在的电气位置频率跌落较快,而远离故障点的电气位置则频率下降较为缓慢,这就导致电网中各点频率变化不一致,使得系统各节点的频率呈现出较为明显的时空分布特性。在大规模系统中,扰动所引起的频率变化在空间上呈现为从扰动中心向电网传播,随电气距离的增加,频率变化量趋于减小,响应延时趋于增加,但该过程非严格单调变化。

在现有频率响应控制策略下,故障后系统中具有频率响应能力的频率响应调节资源依据本地频差确定增减输出功率数量,消除频率波动或拦截频率大幅下降,为后续缓慢的调节手段赢取时间,从而保证系统运行安全。

当功率缺失数量较大时,整个系统内频差时空分布特性较为明显,与远离故障点的设备相比,靠近故障点的频率响应设备所“感知”的频差不仅较大而且较早,使得系统内所有设备的频率响应不仅启动时刻不一样,而且所依据的频差亦不相同。其后果是,在故障发生后,靠近故障点处控制元件的频率响应能力发挥较为充分,而其他位置的控制元件还未发挥或只发挥出部分频率响应能力。

系统的频率响应能力是所有频率响应控制元件频率响应能力的综合。目前被普遍采用的被动频率响应方式,会导致系统内相关设备的频率响应不能迅速同步启动并发挥预期能力,造成系统的频率响应能力难以充分发挥。若能采取措施使得系统内所有设备同步且快速响应,则可有效发挥系统内所有频率响应控制资源的频率响应能力,提升故障后频率最低点,提高频率稳定性,从而避免低频减载和解列事故的发生,保证系统运行的安全与稳定。

集中控制下,距扰动点较远机组能够依据扰动点频差动作,实现所有机组频率响应的同步控制,以快速且充分地发挥整个系统的频率响应潜力,从而更好地保证系统运行安全与稳定。

在这种控制方式下,由于频率响应是依据扰动处信息,按照制定好的的控制参数进行主动控制,故将这种频率响应控制方式称为“主动频率响应”,这种方式下的控制策略称为“主动频率响

应控制策略”^[4]。

随着电网通信技术的发展，基于同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)的广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)，不仅能提供高密度精准频率采样数据，还能实现频差信号的远距离实时传播，这些为发电机组频率响应实现由分散控制到集中控制的转变提供技术基础。

主动频率响应控制的思路是，针对大电网频率较为显著的空间分布特征，利用已趋成熟的先进通信技术，将种类众多的快速频率响应控制手段由传统的依据本地参量的分散比例反馈控制，转变为依据故障处参量的集中事件(或参量)前馈主动控制，通过优化协调控制以充分发挥已有设备控制效能，从而提高系统频率稳定水平。

由于频率响应模型复杂，频率响应过程分析涉及微分方程解算，难以实现在线分析与控制，因此，可采用离线分析、在线应用的方式实现控制。文献[4]开展了相关理论的探索工作。

2.3 动态视角下的频率响应运行调度理论研究

描述频率响应能力最为主要的特征是有功功率—频率自然特性，简称功频自然特性，用于反映电气元件或系统的输出有功功率和对应频差之间的关系，其性能可用自然频率特性(或功频自然特性)系数或单位调节功率来描述。其他特征包括：响应时间、功率输出速率和最大功率等。注意到，目前所采用的有功功率—频率自然特性系数，是频率响应充分完成后的稳态情况下所反映出的特性，为稳态参数^[17]。

火电机组的能量转换过程较为缓慢，因此，其需要快速响应的频率响应增发功率的能量是来自于锅炉蓄热，故其频率响应能力会随锅炉蓄热的增减而动态变化。而水电机组在频率响应控制时间区段内会发生水锤效应，该效应对频率响应的效果产生影响。而水锤效应与水库水位、水轮机运行水流量等参数相关，因此，水轮机组的频率响应能力与运行状态密切相关。

另一方面，频率响应属于分散控制，依据是本地频率；而频率具有时间和空间上的分布特性^[18]，特别是故障初期差异较大，其会导致不同

电气位置的机组频率响应并不同步；大规模可再生能源接入和季节更迭等所导致系统运行方式的变化，均可造成上网机组数量、不同类型容量占比及其运行状态的变化。

上述因素共同作用，使得系统的频率响应表现出较强的非线性动态特性。这意味着，采用静态观点所确定的电网应具有的频率响应能力，在运行中或并不具备，或即使具备也并不一定能全部释放并起作用，甚至可能会大打折扣。当频率响应能力裕度较大时，采用静态观点分析和考量不会引起问题；而当裕度临界时，频率响应“供需”矛盾紧张，则使用原有的静态分析方法会问题凸显。

在频率响应控制手段多元，且需要精细化管理的情况下，应该着力开展动态视角下的频率响应运行调度理论研究，通过准确地确定系统所具有的频率响应能力，以充分利用已有常规频率响应资源；在此基础上通过对各类不同频率响应资源的最优规划、计划与运行配置，以最有效地方式加以利用，提高系统运行效益。

在频率响应的动态模型构建工作中需要计入动态特性的影响，需要解决诸如：如何确定频率响应备用需求数量、若数量不足如何补充、这些备用如何安排、监视、控制和评价等问题，目前均没有成熟的理论和方法，需要加以研究。

3 结论

对电力系统频率响应控制的未来发展趋势、存在的问题和相关研究工作进行了思考和讨论，相关结论如下。

1) 在未来特高压交直流混联电网逐渐成型、新能源机组成为主流、常规火电机组逐步退出、输电、电力电子和通信等技术快速发展、新技术不断涌现、电力市场日趋成熟的背景下，大扰动下电力系统频率稳定控制将面临新的局面。

2) 不同种类频率响应调节资源的精细化统一控制，通过频率响应控制由分散被动反馈控制向集中主动前馈控制的转变，可实现快速频率响应的最优协调控制，有效提高系统整体频率响应控制能力。

3) 在频率响应控制手段多元,且需要精细化管理的情况下,应该着力开展动态视角下的频率响应运行调度理论研究,通过准确地确定系统所具有的频率响应能力,充分利用已有常规频率响应资源,在此基础上通过对各类不同频率响应资源的最优规划、计划与运行配置,以最有效地方式加以利用,提高系统运行效益。

致谢

本文中安全稳定控制框架部分的内容由博士研究生晋萃萃撰写与整理,在此向她表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司. 国家电网公司促进新能源发展白皮书[EB/OL]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017031258/2017-10/22/20171022173158487305092_1.shtml
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 32(22): 1-11.
- [3] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] 李卫东, 晋萃萃, 刘柳, 等. 大功率缺失下主动频率响应控制初探[J/OL]. 电力系统自动化: 1-9[2018-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20180306.1245.002.html>.
- [5] 李卫东, 常焯骥, 陈兆庆, 等. 区域控制偏差的动态内涵[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 146-150.
- [6] GB/T 26399—2011. 电力系统安全稳定控制技术导则. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] Liacco T E D. The adaptive reliability control system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967 (5): 517-531.
- [8] Balu N, Bertram T, Bose A, et al. On-line power system security analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(2): 262-282.
- [9] 王凤蛟, 李鹏. 电力体制改革背景下发电集团面临的挑战和机遇[J]. 发电与空调, 2017, 38(3): 51-55.
- [10] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9.
- [11] 李允超, 宋华伟, 马洪涛, 等. 储能技术发展现状研究[J]. 发电与空调, 2017, 38(4): 56-61
- [12] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8.
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 94-1991. Recommended definitions of terms for automatic generation control on electric power systems[S]. New York, USA, IEEE, 1991.
- [14] 国家电力监管委员会. 发电厂并网运行管理规定[S]. 北京, 国家电力监管委员会, 2006.
- [15] 国家电力监管委员会. 并网发电厂辅助服务管理暂行办法[S]. 北京: 国家电力监管委员会, 2006.
- [16] Anderson P, Fouad A. Power system control and stability[M]. Ames: The Iowa State University Press, 1977.
- [17] Cohn N. Some aspects of tie-line bias control on interconnected power systems[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1956, 75(3): 1415-1436.
- [18] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.

收稿日期: 2017-10-05.

作者简介:



李卫东

李卫东(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统调度自动化、电力市场, 特别是有功功率运行平衡控制及其性能评价、清洁能源并网后的运行调度等理论与应用, wqli@dlut.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)