

[电力系统]

多区域电力系统负荷频率主动控制方法

文/张满 石明明 刘海洋 王琪 刘宏辉 湛业刚
国网安徽省电力有限公司蚌埠供电公司

采用全耦合网状拓扑结构构建多区域电力系统模型，通过主动切换面和控制律生成电力系统负荷频率主动控制量，通过控制器对电力系统负荷频率调节，实现多区域电力系统负荷频率主动控制。经实验证明，该设计方法应用下电力系统联络线功率偏差和负荷频率偏差均得到了有效降低，控制效果良好。

随着工业化、城市化进程的加快，电力需求不断增长，电力系统的规模也日益扩大，涵盖了发电、输电和配电等多个环节。然而，与此同时，电力系统的复杂性也在不断增加，其中负荷频率的波动问题尤为突出。多区域电力系统负荷频率的主动控制，对于提高电力系统的稳定性、安全性和经济性具有重要意义。负荷频率是指在电网中负载发生变化的速度，它的稳定与否对电网的正常运转有着重要的作用。在多区域电力系统中，由于各区域之间负荷特性、电源结构和网络结构等方面的差异，负荷频率的波动更加复杂多变。此外，随着可再生能源的大规模接入，电力系统的负荷频率特性也发生了显著变化，给电力系统的调度和运行带来新的挑战。为应对这些挑战，国内外学者对多区域电力系统负荷频率的主动控制方法进行广泛而深入的研究。

文献[1]提出经VSC-HVDC并网的VSG变参数负荷频率控制策略，利用直流电容器所存储的电能与双馈发电机转子的动能进行协同控制，实现对电机的惯性支持。协调电力系统负荷频率。文献[2]提出基于双人零和博弈的电力负荷频率控制思路，阐述负荷频率控制关键技术。尽管这些方法在一定程度上解决了多区域电力系统负荷频率控制的问题，但仍存在一些局限性，为此提出多区域电力系统负

荷频率主动控制方法。

建立多区域电力系统数学模型

本文采用全耦合网状拓扑结构的多区域电力系统模型，如图1所示。

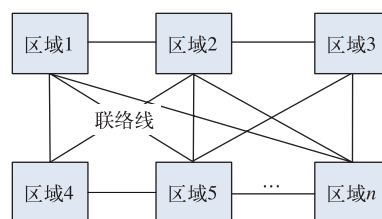


图1 多区域电力系统物理连接拓扑

由图1可知，这种结构的核心特点是各区域之间通过联络线实现了两两互联，形成了一个复杂而高效的电力网络。由于各区域之间通过联络线紧密相连，当某一区域出现电力短缺或过剩时，其他区域可以迅速进行电力支援或调配，从而平衡整个系统的电力供需^[3]。每个区域代表一个电源，电力系统中常见的区域包括水电、风电、太阳能发电以及煤电等，因此在电力系统中引入系数代表各个区域在电力系统中所占的比例，该系数关系到电力系统负荷频率的分配，计算公式为

$$\sum_{n=1} K_n = 1 \quad (1)$$

式中， n 为电力系统区域数量； K_n 为第 n 个区域负荷分配系数^[4]。

在正常运行状态下，由于负荷的波动幅度相对较小，这种微小的变化允许采用一种简化的方法来进行处理，即将负荷频率控制模型进行线性化处理，通过线性化处理，将原本复杂的非线性模型转化为更为简洁的线性模型，从而更容易进行数学分析和计算，因此多区域电力系统数学模型可表示为

$$f = \frac{1}{MK_n}(-ke + \Delta G + V + E + A - \lambda - T_{ye}) \quad (2)$$

式中， f 为多区域电力系统数学模型； M 为电力系统发电机惯性常数； k 为电力系统发电机阻尼系数； e 为区域负荷频率偏差； ΔG 为电力系统发电机发电功率偏差； V 为电力系统风能功率偏差； E 为电力系统煤电功率偏差； A 为电力系统太阳能发电功率偏差； T_{wr} 为电力系统区域联络线功率偏差； T_{ye} 为电力系统负荷扰动。

以此建立多区域电力系统模型，描述电力系统各个区域负荷频率状态，以及为后续负荷频率主动控制提供主体。

系统负荷频率主动控制

将以上建立的数学模型作为控制主体，考虑到每个区域都有其独特的负荷特性和运行条件，因此根据具体情况，为每个区域量身定制合适的负荷频率控制器。这样的设计思路，旨在确保每个区域都能根据自身的负荷变化和系统需求，进行灵活而有效的频率调节^[5]。以下对主动控制器的主动切换面和控制律进行设计。在主动变结构控制中，一般点与开始点无多大意义，而端点则具有特定的意义，因此，本文提出一种新的主动变结构控制器。假设一个超平面上一个区域中的每一个点都是端点，那么当一个移动点靠近这个端点时，它就会被这个端点“吸引”到这个端点。在开关平面上，由于系统的惯性作用，使得移动点在开关面上做微小的、高频的抖动，这就是“主动运动”，也就是“主动模态”，此区域称为“有源模式区”，也就是“主动区”^[6]。主动切换面是使控制轨迹最终能到达并沿着这个切换面运动的平面。这个切换面必须是稳定的，即当系统状态沿着切换面运动时，最终会达到平衡点，根据以上建立的数学模型，可以

将电力系统负荷频率主动切换面表示为

$$s(t) = Xf - \int X(L - \min a)_{\Delta} f dt \quad (3)$$

式中， $s(t)$ 为电力系统负荷频率主动切换面； X 为常数矩阵； L 为反馈增益矩阵； $\min a$ 为电力系统负荷频率最小采样率。

为实现对电力系统负荷频率的主动控制，提出一种基于饱和函数的主动控制策略，得到主动控制输入量：为使多区域电力系统负荷频率状态在有限时间内快速地达到所期望的状态，并保持在该状态上^[7]。通过控制律将系统状态引入到切换面上，从而实现对系统的控制，电力系统负荷频率主动控制律为

$$u(t) = -Lf + [Xs(t)]^2 - |h| \text{sat}\theta \quad (4)$$

式中， $u(t)$ 为电力系统负荷频率主动控制量； h 为扰动补偿增益； $\text{sat}\theta$ 为饱和函数。

将以上计算得到的 $u(t)$ 作为主动控制器输出量，通过主动控制器将其输入到电力系统中，对多区域电力系统负荷频率偏差进行调节和控制，以此实现多区域电力系统负荷频率主动控制。

实验论证

1. 实验准备与设计

以下通过实验验证本文所提的多区域电力系统负荷频率主动控制方法的性能，以某4区电力系统为实验对象，该电力系统具体参数见表1。

表1 多区域电力系统参数表

参数	区域1	区域2	区域3	区域4
发电机惯性常数	15	15	15	15
发电机阻尼系数	1.25	1.25	1.45	1.45
下垂特性参数	0.03	0.03	0.03	0.03
频率偏差系数	41.52	62.25	41.52	62.25
风力涡轮机时间常数	0.45	0.45	0.65	0.65
太阳能发电系统时间常数	1.35	1.35	1.35	1.35
虚拟惯性时间常数	10.55	10.55	10.55	10.55
同步系数	0.01	0.01	0.01	0.01

对于该电力系统负荷频率主动控制，设定控制参数如下：主动采样周期为0.01 s，主动控制增益矩阵边界为 10^5 ，指数衰减速率设置为0.05，四个区域控制事件触发阈值参数分别设置为0.03、0.05、0.01和0.03。利用本文设计方法对系统负荷频率进行制动控制，同时为使实验数据具有一定的说服力，选择两种现行方法与其对比，测评方法性能。

2. 实验结果与讨论

多区域电力系统负荷频率控制效果可以通过电力系统联络线功率偏差和负荷频率偏差反映出来, 联络线功率偏差和负荷频率偏差越大, 则表示负荷频率控制效果越差, 联络线功率偏差计算公式为

$$\lambda = \Delta U / n - \varepsilon \times b \quad (5)$$

式中, ΔU 为电力系统所有区域发电功率总和; ε 为电力系统特性相关的系数; b 为电力系统负荷频率变化值。电力系统负荷频率偏差计算公式为

$$ACE = \beta M_n + \lambda \quad (6)$$

式中, ACE为电力系统负荷频率偏差; β 为电力系统负荷频率偏差系数; M_n 为第 n 个区域频率偏差。将以上两个偏差指标作为控制方法性能评价指标, 图2、图3为三种方法应用下电力系统联络线偏差曲线图和负荷频率偏差曲线图。

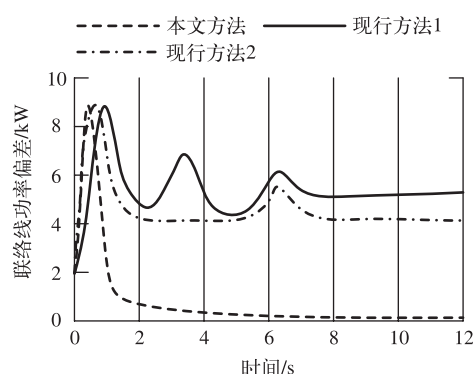


图2 多区域电力系统联络线功率偏差

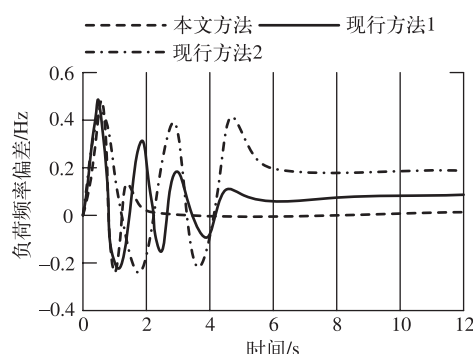


图3 多区域电力系统负荷频率偏差曲线

从图2、图3可以看出, 本文方法应用下电力系统联络线功率偏差在1.05 s时趋于0, 并且在1.35 s时负荷频率偏差趋于0, 而现行方法1应用下电力系统联络线功率偏差平均值为5.15 kW, 负荷频率偏差平均值为0.28 Hz, 现行方法2应用下电力系统联

络线功率偏差平均值为4.85 kW, 负荷频率偏差平均值为0.32 Hz, 均远远高于本文设计方法。证明设计方法在多区域电力系统负荷频率主动控制方面具有绝对的优势, 可以实现对负荷频率的精准控制。

结束语

多区域电力系统负荷频率主动控制方法的研究, 是电力系统领域一项具有重要意义和挑战性的工作。随着电力需求的不断增长和电力系统的日益复杂化, 负荷频率的波动问题愈发突出, 对电力系统的稳定运行和高效管理提出了更高要求。本文围绕多区域电力系统负荷频率主动控制方法展开研究, 通过深入分析多区域电力系统的特性, 提出基于多区域协同和智能优化算法的控制策略。这些策略有助于降低负荷频率的波动, 提高电力系统的稳定性, 为电力系统控制提供理论支撑。EA

(收稿日期: 2024-12-20)

参考文献

- [1] 赵熙临, 龚楚峰, 付波. 一种风电场经VSC-HVDC并网的VSG变参数负荷频率控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50 (1): 117-126.
- [2] 李寅生, 王冰, 陈玉全, 等. 基于双人零和博弈的孤岛微电网有界 L_2 增益负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (3): 93-102.
- [3] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (17): 101-109.
- [4] 范培潇, 胡文平, 温裕鑫, 等. 基于可进化PID的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略[J]. 全球能源互联网, 2023, 6 (3): 258-265.
- [5] 郭强, 薛志伟, 芦晓辉等. 含风光水火储的多区域互联电力系统协同优化负荷频率控制[J]. 热力发电, 2023, 52 (3): 136-143.
- [6] 邹屹东, 钱晶, 张文英, 等. 基于CPSOGSA算法的风-光-小水电微电网负荷频率最优 H_2/H_∞ 鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (11): 42-51.
- [7] 梁煜东, 陈峦, 张国洲, 等. 基于深度强化学习的多能互补发电系统负荷频率控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1768-1779.