

基于全景量测的聚合电网概念、调控方法及其应用

郝广涛¹, 韩学山², 林振衡¹, 郭晓君¹, 张友泉³, 张学清⁴

(1. 莆田学院 新能源装备检测福建高校重点实验室, 福建 莆田 351100;

2. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250061; 4. 国网烟台市供电公司, 山东 烟台 265400)

摘要:随着可再生能源发电大规模并入电网发输配用各个部分,为使源网荷在频率限定范围内最大限度地消纳可再生能源有功发电,需对其运行调控实施全局统筹。为此,在电网全景过程化量测条件下给出聚合电网调控方法。提出聚合电网、可观测点、可观测点的观测函数和调控函数的概念,在此基础上,给出聚合电网性能指标,提出可观测点、可观测点的观测函数和调控函数之间的互动关系,实现聚合电网渐进调控机制。在线调控算例对所提方法进行了验证。

关键词:全景过程化量测;聚合电网;可观测点;观测函数;调控函数

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908026

0 引言

发电与负荷随时间不断发生周期性变动,使电力系统面临有功输电和节点电压水平的安全监测以及发电有功功率和电压的调度与控制(简称调控)问题^[1]。当今,随着节能减排、能源洁净化政策的不断推进和实施,可再生能源发电以集中、分布的形式不断地并入电网,使监测尤其是调控出现了“双向流”等新问题^[2],更加剧了监测和调控的难度。

为了最大化利用可再生能源发电,必须统筹发、输、配、用等各级电网,因此未来电网无论是超前的决策(如机组组合、超前调度)还是在线控制(在线调控等)都必须实施全局统筹,理论上而言,传统分离方式失效(即传统发输配用分层、分级调控时,将上层、上级等效为电源,同时将下层、下级等效为负荷的分离方式。这种方式属于传统静态的调控方式,没有考虑配电网、用户侧存在大量波动的可再生能源发电而成为电源的可能性)。在GPS的基础上,由同步相量测量单元PMU(Phasor Measurement Unit)引导的电网广域量测系统WAMS(Wide-Area Measurement System)的完善和普及^[3],可实现电力系统运行状态全景过程化可观测,形成具有时间标签的电网运行状态数据,从而为实现有功功率和电压水

平在电网整体最优层面上的统一监测和调控提供技术基础^[4]。

目前,针对可再生能源发电并入电网后输配不分产生的“双向流”问题,“区域自律与集中统筹”的调控策略已成为国内外专家学者的共识^[5],如文献[6-8]从电网分级、分区角度,提出区域调度中心分散自治、区域之间由上级调度中心协调调控的方法;文献[9-11]从算法的角度,论述集中式调控方法无法适应智能电网的需求,提出将增广拉格朗日函数法、交替方向乘子法和一致性算法应用于分散式调控领域;文献[12-14]从主动配电网、微网、虚拟电厂等角度,提出电、气、风、光、储、冷、热等协调优化调度模型,以实现区域资源互补。

但目前鲜有文献在电力系统大数据环境下应用人工智能手段,从发输配用电网统筹层面上研究分散协调的调控方法。为此,本文在前人研究的基础上,在电力系统运行状态全景过程化可观测条件下,从最基本的概念出发,提出聚合电网分散、聚合电网间协调的统筹调控构架,并以单层聚合电网为例,对其在线调控应用予以验证。

1 电网拓扑、全景观测信息及全局统筹调控之间的关系

1.1 电网拓扑与全局统筹的关系

拓扑分析是电网能量管理系统的基础,是潮流计算、安全分析、运行控制等的前提。因此,要实现电网全局集中统筹,必须已知电网拓扑(涵盖传统发输配用等级电网)。

然而,电网全局拓扑信息是分散管理的,由此笔者在文献[15]中给出了电网全局拓扑的形成方法。

1.2 全景观测信息与全局统筹的关系

随着能源互联网的建设发展,WAMS已经逐步

收稿日期:2019-03-01;修回日期:2019-06-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB228205);国家自然科学基金资助项目(51477091);福建省自然科学基金资助项目(2018J01557);莆田学院科研资助项目(2018087)

Project supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB228205), the National Natural Science Foundation of China (51477091), the Natural Science Foundation of Fujian Province (2018J01557) and the Scientific Research Foundation of Putian University (2018087)

实现了电网全景可观测。随着电网过程化的运行,积累了电网全景过程化运行状态大数据,在此基础上,可利用人工智能相关方法推演电网未来的调控方式。

然而,这些全景观测信息是以电网拓扑为基础形成的,其管理方式与电网拓扑相同,是按电压等级分散管理的,由此,电网统筹调控也应具有相同的方式。

因此,从本质上而言,电网拓扑、全景观测信息以及电网全局统筹调控方式是一致的,均属于分散协调的管控方式。

2 聚合电网及可观测点

为了清楚地论述电网全局拓扑与全景观测信息之间的关系,并为实现电网调控提供基础,本文提出聚合电网和可观测点的概念。

2.1 聚合电网

电力系统是由若干电压等级的输配环节通过厂站和输电元件有机构成的整体。在广域量测环境下,各节点以及各输电线路的电压、电流及其相位均可观测,则可按电压等级由高到低排序,将厂站视为聚集到与其直接相连的输电线路一端的一个虚拟点,称为聚合厂站。

在某一电压等级下,若干聚合厂站及其直接连接的输电线路所构成的电网就称为聚合电网。由此,电网全局拓扑由一个立体树状的若干个聚合电网组成。

对于聚合电网间起联络作用的厂站,其聚集有对上和对下的双重性(联络厂站存在多个可观测点,分别与一个聚合电网直接连接,从而联络多个聚合电网,是多个聚合电网协调的重要参量。深入的问题本文暂不讨论,将在后续论文中予以阐述),即每个聚合电网应该包容全方位信息,不同聚合电网虽然分离,但具有广域性。

例如,对于附录A中图A1所示的电力系统一次接线图,经过拓扑分析后得到附录A中图A2所示结果。由图A2可见,其包含多个电压等级,其中500 kV电压等级电网由1号站、2号站及其之间的一条输电线路组成。根据聚合厂站的定义,若节点4能够解析地表达1号站的特性,可以认为1号站聚合至节点4,节点4可以认为是一虚拟节点。对于2号站而言,其节点5和节点6分别与500 kV电压等级电网和220 kV电压等级电网连接。对于500 kV电压等级电网而言,根据聚合厂站的定义,若节点5能够解析地表达2号站的特性,节点5可以认为是一虚拟节点。则由虚拟节点4、5及其之间的一条输电线路就组成了500 kV电压等级的聚合电网,如附录A中图A3所示。依此类推,可形成220 kV电压等级的

聚合电网,如附录A中图A4所示(其他聚合电网络)。

2.2 可观测点

厂站与某一电压等级输电线路直接连接的节点称为可观测点。可观测点一定存在于厂站之中。由拓扑分析可知^[15],厂站拓扑由发电机组、变压器、断路器、隔离开关等一次设备构成。某一厂站的可观测点数与其拓扑分析的连通状况有关,可观测点数与连通片(连通片由厂站内无阻抗元件直接连接形成)数量相同。

例如,对于图1所示的某电压等级的电力系统一次接线图,经过拓扑分析可得图2所示结果。从图2中可以明显看出,3个厂站均仅存在1个连通片,因此,该简单电力系统存在3个可观测点。

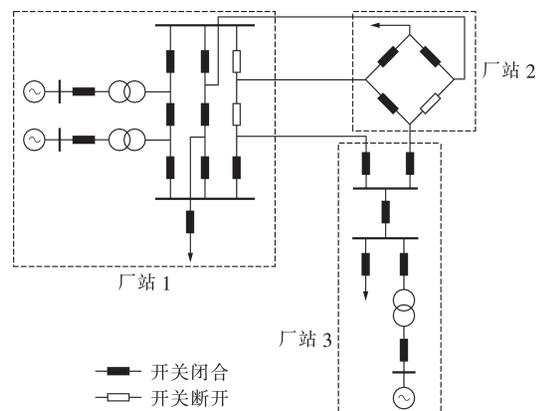


图1 某电力系统一次接线图

Fig.1 Primary electric wiring diagram of a power system

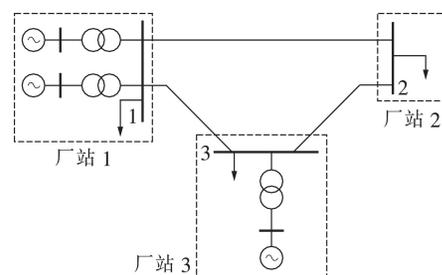


图2 拓扑分析结果

Fig.2 Results of topology analysis

3 可观测点的观测函数和调控函数概念及抽象表达

在聚合电网、可观测点概念的基础上,通过广域量测可以获得电网过程化运行状态。通过人工智能方法可以推演主动量与被动量之间的关系,实现电网的渐进调控。对此,本文提出可观测点的观测函数和调控函数。

3.1 可观测点的观测函数

在广域量测环境下,通过在各厂站配置的PMU可以实时获得可观测点的电压和输电线路电流,这些信息的历史轨迹就是电网真实的广域过程,是电

网渐进调控的基础。

例如,在 t 时刻,对应图 2 中的可观测点 $k(k=1,2,3)$,通过在每条输电线路配置的广域量测,如第一个可观测点的量测是和其直接连接的 2 条输电线路的电流和母线电压的相量,依此类推,可以对 3 个可观测点实施快速的戴维南等值,求出戴维南等值电势 E_k^t 和等值阻抗 Z_k^t ,由此形成可观测点的观测函数(简称观测函数):

$$E_k^t - V_k^t = Z_k^t I_k^t \quad (1)$$

其中, V_k^t 为可观测点 k 的电压相量; I_k^t 为流出(入)可观测点 k 的电流相量。

由式(1)可见,可观测点的电压相量和输电线路电流相量是表征聚合电网本质特征的变量,是聚合电网电压和输电安全所要监测的量,这 2 个量属于观测函数的因变量。同时, E_k^t 和 Z_k^t 是厂站内部特征的外在反映,该特征与聚合电网的本质特征直接关联,是调控聚合电网特征的重要参量,这 2 个量是观测函数的自变量。

由此可知,在长时间、过程化的观测过程中,任何一个可观测点通过观测函数至少可知其关联的厂站内部自变量的变化对与其直接关联的因变量的影响。针对不同的研究问题(如安全经济调度、在线调控等),该观测函数有不同的表达形式(如后文在线调控应用的表达)。

3.2 可观测点的调控函数

对应于图 2,由式(1)的观测函数反映聚合电网的特征示意如图 3 所示。

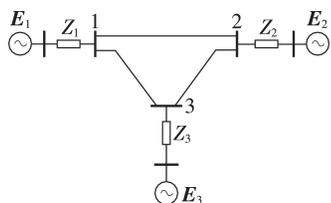


图 3 聚合电网特征示意

Fig.3 Schematic map of aggregation power system

由图 3 可以看出,改变观测函数中的参量 E_k^t 和 Z_k^t 就可以改变聚合电网的性能。观测函数中的参量 E_k^t 和 Z_k^t ,结合聚合电网特征的关联,可形成电磁功率特性,该特性上的某一运行点就是该厂站内有功功率和无功功率的运行方式,即厂站的主动(或被动)控制量。

显然,由式(1)所示观测函数可以得到可观测点 k 的电磁功率特性为:

$$P_k^t + jQ_k^t = V_k^t \left(\frac{E_k^t - V_k^t}{Z_k^t} \right)^* \quad (2)$$

其中, P_k^t 和 Q_k^t 分别为流出(或流入)可观测点 k 的有功和无功功率;“*”表示共轭。

由式(2)可见, P_k^t 、 Q_k^t 、 V_k^t 为聚合电网的状态量, E_k^t 和 Z_k^t 为厂站内主动控制量与状态量的中间量,其与主动控制量之间的函数关系可以通过人工智能领域的方法获得(如果是负荷性质的可观测点,本质相同,只是控制量不同),从而可以获得聚合电网状态量与厂站主动量之间的函数关系。

例如,设发电厂内的主动控制量有发电机组的有功功率输出 P_G 、励磁调节位置 E_q 、变压器分接头可调变比位置 b 、可投切无功补偿设备 Q_c ,则当预测到聚合电网未来 $t + \Delta t$ 时刻的负荷水平 $P_d^{t+\Delta t}$ 以及 $Q_d^{t+\Delta t}$ 时,对过程化历史调控决策信息进行学习,就可以渐进改变这些控制量位置,从而形成可观测点的调控函数(简称调控函数):

$$\begin{cases} P_k^{t+\Delta t} = f_1(P_G, P_d^{t+\Delta t}) \\ V_k^{t+\Delta t} = f_2(E_q, b, Q_c, Q_d^{t+\Delta t}) \end{cases} \quad (3)$$

针对不同的研究问题,式(3)中主动量和被动的调控函数不同。

4 聚合电网性能指标以及聚合电网之间的协调调控方式

4.1 聚合电网性能指标

聚合电网最基本的性能是输电线路的载流和电压。在电网运行的任意时刻,通过观测函数可以观测到电压水平和输电线路载流,并判断是否处于安全水平。当处于警戒线,就可以利用聚合电网各个调控函数进行校正。

从而,以聚合电网性能指标为核心,实现观测函数、调控函数间的互动,建立聚合电网调控的基础。

4.2 聚合电网间的协调

全局电网由若干聚合电网通过联络厂站组成。联络厂站内部存在若干个(一般是 2 个或 3 个)可观测点,分别与对应的聚合电网关联。这些可观测点对外参与相应聚合电网的调控,对内又属于同一个厂站,可以相互协调,由此实现聚合电网间的协调调控。

5 在线调控应用

在线调控分为实时安全经济调度和自动发电控制(AGC)2 个阶段。

针对在线调控应用,下面首先给出电网历史经验库,然后给出观测函数,最后以深度学习为手段给出调控函数。

5.1 电网历史经验库

电网广域化后,可实现运行状态的过程化观测并进行实时记录,包含预测、决策和执行等信息。随着电网过程化的长时间运行,这些真实记录的运行数据几乎涵盖了所有场景,是电网未来调控重要

的经验积累,因此形成经验数据库至关重要。

设实时安全经济调度的前5 min内的时刻以 t 表示,已知网络拓扑分析结果 T_{pt} 、机组组合 U_{ct} 、机组 i 的成本函数 f_i 、机组 i 有功出力上限 P_{Gi}^{\max} 和下限 P_{Gi}^{\min} 、机组 i 运行的爬坡上限 U_{Ri} 和下限 D_{Ri} 、输电线路 l 允许的有功功率传输上限 P_l^{\max} 和下限 P_l^{\min} ,该信息是实时安全经济调度实施前的已知信息,记为 A_t :

$$A_t = \begin{cases} T_{pt} \\ U_{ct} \\ f_i & i=1,2,\dots,N_G \\ [P_{Gi}^{\min} & P_{Gi}^{\max}] & i=1,2,\dots,N_G \\ [D_{Ri} & U_{Ri}] & i=1,2,\dots,N_G \\ [P_l^{\min} & P_l^{\max}] & l=1,2,\dots,L \end{cases} \quad (4)$$

其中, N_G 为发电机总数; L 为线路总数。

设通过超短期负荷预测得到超前 t 时刻5 min各节点负荷为 P_{di}^t ,则经过实时安全经济调度可得到各机组的最优分配基值 P_{Gi}^t 、经济分配因子 α_i^t 、发电机成本数值 f_i^t ,记为 B_t :

$$B_t = \begin{cases} P_{di}^t & i=1,2,\dots,N \\ P_{Gi}^t & i=1,2,\dots,N_G \\ \alpha_i^t & i=1,2,\dots,N_G \\ f_i^t & i=1,2,\dots,N_G \end{cases} \quad (5)$$

其中, N 为节点总数。

将实时安全经济调度制定的决策提交执行后,预测负荷与实际负荷的偏差以及负荷的随机扰动由 AGC 软件调节。设在 $t+\Delta t$ ($\Delta t=5$ min) 时刻,观测到电网的实际运行状态信息 $C_{t+\Delta t}$:

$$C_{t+\Delta t} = \begin{cases} P_{di}^{t+\Delta t} & i=1,2,\dots,N \\ P_{Gi}^{t+\Delta t} & i=1,2,\dots,N_G \\ P_l^{t+\Delta t} & l=1,2,\dots,L \\ \Delta P_{Sl}^{t+\Delta t} & l=1,2,\dots,L \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{di}^{t+\Delta t}$ 、 $P_{Gi}^{t+\Delta t}$ 、 $P_l^{t+\Delta t}$ 、 $\Delta P_{Sl}^{t+\Delta t}$ 分别为 $t+\Delta t$ 时刻节点 i 的有功负荷、发电机 i 的有功输出、输电线路 l 的有功功率、输电线路 l 的有功损耗。

式(4)~(6)由实时安全经济调度和 AGC 的一次实施过程获得,是实时安全经济调度与 AGC 实施的一次经验。

5.2 观测函数的形成

聚合电网的信息是集中管理的,因此其任一可观测点 k 都可获得式(4)~(6)所示的经验。

式(5)、(6)的经验中还存在隐含信息。式(7)中最优决策获得的发电机 i 有功输出为 P_{Gi}^t ,经济分配因子为 α_i^t ,设在 $t+\Delta t$ 时刻负荷总扰动量为 $\Delta P_D^{t+\Delta t}$,则 $t+\Delta t$ 时刻发电机 i 有功输出 $\tilde{P}_{Gi}^{t+\Delta t}$ 为:

$$\tilde{P}_{Gi}^{t+\Delta t} = P_{Gi}^t + \alpha_i^t \Delta P_D^{t+\Delta t} \quad (7)$$

由于实际负荷与预测负荷的误差 $\Delta P_{di}^t = P_{di}^{t+\Delta t} -$

P_{di}^t ($i=1,2,\dots,N$) 以及发电机限值、爬坡速度等影响, $t+\Delta t$ 时刻的实际观测值与式(7)最优决策具有一定的偏差:

$$\Delta P_{Gi}^t = P_{Gi}^{t+\Delta t} - \tilde{P}_{Gi}^{t+\Delta t} \quad (8)$$

同时,输电线路 l 上的实际有功传输 $P_l^{t+\Delta t}$ 可能越限:

$$\Delta P_l^t = P_l^{t+\Delta t} - P_l^{\max} \quad (9)$$

式(8)、(9)的偏差主要是由负荷预测偏差导致的,是调控重要的经验,称为观测函数:

$$D_{t+\Delta t} = \begin{cases} \Delta P_{di}^t \\ \Delta P_{Gi}^t \\ \Delta P_l^t \end{cases} \quad (10)$$

式(4)~(6)、(10)均属于在线调控过程中的一次经验,汇总为:

$$J_t = \{A_t, B_t, C_{t+\Delta t}, D_{t+\Delta t}\} \quad (11)$$

随着时间的推移,可以不断记录式(11),形成在线调控的经验库:

$$J = \{J_{t-n\Delta t}, J_{t-(n-1)\Delta t}, \dots, J_t\} \quad (12)$$

其中, n 为一给定正实数。

5.3 调控函数的形成

在上述经验库的基础上,利用深度学习中的长短期记忆 LSTM (Long Short Term Memory) 网络^[16] 就可以预测未来在线调控。

LSTM 单元的基本结构如附录 A 中图 A5 所示,其运行方式为:首先 LSTM 单元通过遗忘门接收当前输入信息 x_t 和前一时刻 LSTM 的隐含信息 h_{t-1} ,在激活函数 σ 的作用下过滤输入信息,获得遗忘门的输出 f_t :

$$f_t = \sigma(w_{fx}x_t + w_{fh}h_{t-1} + b_f) \quad (13)$$

其中, w_{fx} 、 w_{fh} 分别为遗忘门权值和前一时刻 LSTM 的隐含信息权值; b_f 为偏置量。

同时,输入门的作用是决定新信息加入 LSTM 的数量,包含过滤当前输入信息 x_t 、LSTM 前一时刻隐含信息 h_{t-1} 的 i_t 和新内容 \tilde{C}_t :

$$i_t = \sigma(w_{ix}x_t + w_{ih}h_{t-1} + b_i) \quad (14)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(w_{cx}x_t + w_{ch}h_{t-1} + b_c) \quad (15)$$

其中, w_{ix} 、 w_{ih} 分别为过滤当前输入信息权值和过滤 LSTM 前一时刻隐含信息权值; w_{cx} 、 w_{ch} 分别为新内容中当前输入信息权值和新内容中 LSTM 前一时刻隐含信息权值; b_i 、 b_c 为偏置量。

通过过滤信息、增加新信息,得到 t 时刻 LSTM 记忆的信息 C_t :

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tilde{C}_t \quad (16)$$

根据 t 时刻 LSTM 记忆的信息 C_t ,由输出门决定输出到当前状态 h_t 的比例 o_t 和当前状态信息 h_t :

$$o_i = \sigma(w_{ox}x_i + w_{oh}h_i + b_o) \quad (17)$$

$$h_i = o_i \tanh C_i \quad (18)$$

其中, w_{ox} 、 w_{oh} 分别为输出门的输出对应于当前输入信息和当前状态的权值; b_o 为偏置量。

通过过滤输出当前状态信息 h_i , 得到 LSTM 网络的输出值:

$$y_i = \sigma(w_y h_i + b_y) \quad (19)$$

其中, w_y 为输出当前状态信息的权值; b_y 为偏置量。

式(13)—(19)中激活函数 σ 通常选择 sigmoid 函数, 通过将变量映射到 $[0, 1]$ 间以取舍信息。

根据 5.1 节和 5.2 节的内容, 选择具有时间序列的经验库式(12)作为输入量 x , 输出量选择发电机的有功输出 P_{Gi} ($i=1, 2, \dots, N_G$)。

对于每个可观测点而言, 当预测到未来时刻聚合电网的负荷水平 P'_{di} ($i=1, 2, \dots, N$) 后, 利用输入量、输出量进行 LSTM 训练网络, 就可以获得 LSTM 网络权值, 从而形成式(19)的调控函数。

6 在线调控算例

以图 4 所示的山东 500 kV 聚合电网为例, 在 Windows 10 系统中采用 Python 结合 SQL Server 数据库验证本文算法。

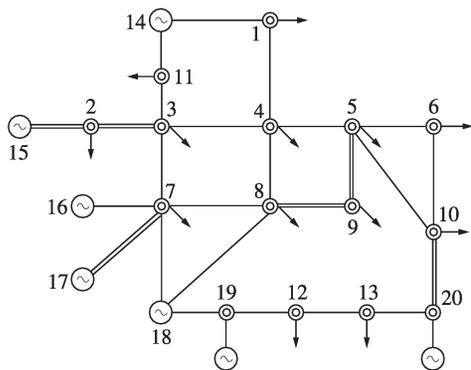


图 4 山东 500 kV 聚合电网结构
Fig.4 Structure of Shandong 500 kV aggregation power grid

图 4 所示电网共有 20 个可观测点(其中 7 个显示发电特性(共含 16 台机组), 13 个显示负荷特性)、31 条输电线路, 输电线路参数如附录 A 中表 A1 所示。

6.1 经验库的形成

某年第三季度共 92 d, 每天以 5 min 为采样间隔, 形成式(4)—(6)所示经验库的一个时间断面信息。

为清晰记录经验库中各项内容, 在 SQL Server 数据库中建立存储空间 A 、 B 、 C , 以时间为标签分别记录式(4)—(6)中的信息。

6.2 观测函数的形成

在 6.1 节形成的存储空间 B 、 C 的基础上, 按照式(10)进行计算, 形成实际负荷与预测负荷的误差 $\Delta P'_{di}$ ($i=1, 2, \dots, 20$)、发电机决策偏差 $\Delta P'_{Gi}$ ($i=1, 2, \dots, 16$)、输电线路安全距离偏差 $\Delta P'_l$ ($l=1, 2, \dots, 31$)。

在 SQL Server 数据库中, 建立存储空间 D , 对应 $\Delta P'_{di}$ ($i=1, 2, \dots, 20$)、 $\Delta P'_{Gi}$ ($i=1, 2, \dots, 16$)、 $\Delta P'_l$ ($l=1, 2, \dots, 31$), 分别以时间为名称建立表存储, 形成观测函数。

按照时间由远及近共 92 d, 每天以 5 min 为间隔, 共形成 $92 \times 24 \times 12 = 26\,496$ (个) 时间断面, 按式(12)形成 A — D 经验库, 为未来在线调控提供基础。

6.3 调控函数的形成

采用存储空间 A — D 中的 7 月、8 月信息作为 LSTM 网络的训练数据, 9 月 1 日信息作为测试数据。

由于显示发电特性的可观测点 k ($k=14, 15, \dots, 20$) 调控其对应厂站内发电机有功, 既要兼顾其他厂站发电机状况, 也要兼顾聚合电网所有输电线路输电安全, 因此对于这类可观测点而言, LSTM 网络的输入量相同, 如表 1 所示。

表 1 t 时刻可观测点 k 的 LSTM 网络输入、输出量
Table 1 Inputs and outputs of LSTM network for observable point k at moment t

序号	输入量	输出量
1	16 台发电机的成本函数	
2	16 台发电机的有功上限	
3	16 台发电机的有功下限	
4	16 台发电机的爬坡上限	
5	16 台发电机的爬坡下限	
6	31 条输电线路的有功传输上限	
7	31 条输电线路的有功传输下限	
8	13 个负荷节点的预测值	
9	16 台发电机安全经济调度基值	可观测点 k 对应厂
10	16 台发电机经济分配因子	站发电机有功出力
11	16 台发电机成本值	
12	13 个负荷节点实际负荷值	
13	16 台发电机实际有功出力	
14	31 条输电线路实际有功潮流	
15	31 条输电线路实际有功损耗	
16	13 个负荷节点预测偏差	
17	16 台发电机有功出力偏差	
18	31 条输电线路越限偏差	

对于显示负荷特性的可观测点 k ($k=1, 2, \dots, 13$) 而言, 没有调控量, 无需调控。

在 LSTM 网络权值训练过程中, 表 1 中序号 1—7、11、15 的输入量在程序中作为约束量, 序号 8—10、12—14、16—18 的输入量通过前向计算得到初步结果, 通过反向误差传播获得不断改进的网络权值。

经过改进后的 LSTM 网络权值, 采用 9 月 1 日每隔 5 min 输入、输出值进行测试, 结果如附录 A 中表

A2所示,偏差计算方式为:

$$e = \left| \frac{r-p}{r} \right| \times 100\% \quad (20)$$

其中, e 为误差; r 为真值; p 为预测值。

由表A2可以看出,16台发电机组的有功出力预测值与实际值偏差在0.01%~1%之间。对此结果进行分析发现,实际AGC机组的爬坡和出力限值都没有产生限制,而超前5 min的负荷预测值与实际值的误差在1%之内,这是导致误差的主要原因,如表2所示(表中仅列出偶数时刻点,预测值与实际值均为标么值)。

表2 负荷预测与实际值偏差

Table 2 Deviations of predicted and actual load values

时刻	预测值	实际值	误差/%
02:00	55.45	55.66	0.27
04:00	55.69	55.79	0.18
06:00	57.34	57.63	0.51
08:00	58.78	58.84	0.10
10:00	59.88	59.96	0.14
12:00	59.78	60.06	0.47
14:00	60.23	60.81	0.95
16:00	59.54	59.60	0.10
18:00	58.45	58.53	0.14
20:00	61.48	61.72	0.39
22:00	58.45	58.73	0.47
24:00	56.45	56.99	0.94

因此,提高负荷预测的精度,尤其是在后续可再生能源并网的情况下,对于实时安全经济调度以及AGC具有重要作用。除此之外,当局部电网拓扑结构及其参数发生变化(如图4中可观测点2与可观测点3之间只有一条输电线路)时,LSTM通过训练获得的16台发电机组的有功出力预测值与潮流模拟计算值的偏差在0.8%~2%之间。进一步,当图4中可观测点2和可观测点15脱网时,LSTM通过训练获得的15台发电机组的有功出力预测值与潮流计算值的偏差在2%~3%之间。

7 结论与展望

本文提出基于全景量测的聚合电网概念、调控方法及其应用,通过对实际算例的仿真验证可得如下结论:

(1)聚合电网、可观测点、观测函数、调控函数等概念符合实际电网运行;

(2)根据聚合电网过程化历史运行调控信息,采用LSTM方法对未来调控是可行的。

本文在聚合电网概念的引导下,建立了聚合电网调控的基本框架和模型,并进行了细致的理论分析。在此基础上,下一步将更深入地研究该理论和方法,从而使其更贴近实际,发挥实际应用的指导作用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 石亮缘,周任军,李娟,等. 基于时间序列相似性度量的新能源-负荷特性指标[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):75-81. SHI Liangyuan,ZHOU Renjun,LI Juan,et al. New energy-load characteristic index based on time series similarity measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):75-81.
- [2] CHUN-HAO L,NIRWAN A. Decentralized controls and communications for autonomous distribution networks in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(4):2071-2078.
- [3] 刘灏,许苏迪,毕天姝,等. 基于同步相量数据的谐波波还原算法[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):153-160. LIU Hao,XU Sudi,BI Tianshu,et al. Inter-harmonic reduction algorithm based on synchrophasor measurements[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):153-160.
- [4] 陈亦平,陈伟彪,姚伟,等. WAMS错误数据的快速辨识及恢复方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):95-101. CHEN Yiping,CHEN Weibiao,YAO Wei,et al. Rapid identification and recovery of wrong WAMS data[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):95-101.
- [5] 孙宏斌,张伯明,吴文传,等. 自律协同的智能电网能量管理系统家族:概念、体系架构和示例[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):1-5. SUN Hongbin,ZHANG Boming,WU Wenchuan,et al. Autonomous-synergetic energy management system family for smart grids: concept, architecture and case[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):1-5.
- [6] 文云峰,郭创新,郭剑波,等. 多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3724-3733. WEN Yunfeng,GUO Chuangxin,GUO Jianbo,et al. Coordinated decentralized risk-based dispatch of multi-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3724-3733.
- [7] 朱泽磊,程鑫,杨桂钟,等. 基于母线负荷预测改进的省地协同发电计划优化方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):665-675. ZHU Zelei,CHENG Xin,YANG Guizhong,et al. Collaborative scheduling optimization method for provincial grid and regional grid based on refined busload forecast[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(3):665-675.
- [8] LAI Xiaowen,XIE Le,XIA Qing,et al. Decentralized multi-area economic dispatch via dynamic multiplier-based Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3225-3233.
- [9] 刘宝英,杨仁刚. 采用辅助问题原理的多分区并行无功优化算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):47-51. LIU Baoying,YANG Rengang. Multi-subarea parallel reactive power optimization based on APP[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(7):47-51.
- [10] TOMASO E. Distributed optimal power flow using ADMM[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(5):2370-2380.
- [11] 李佩杰,陆辅,白晓清,等. 基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2428-2435. LI Peijie,LU Yong,BAI Xiaoqing,et al. Decentralized optimization for dynamic economic dispatch based on alternating direction method of multipliers[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(10):2428-2435.
- [12] 周亦洲,孙国强,黄文进,等. 多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23):6780-6790. ZHOU Yizhou,SUN Guoqiang,HUANG Wenjin,et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a

- virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
- [13] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921.
XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.
- [14] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [15] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 多代理系统和黑板模型结合的全景电网拓扑分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 200-210.
HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. The panorama power system topology analysis based on multi-agent system and blackboard model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 200-210.
- [16] 朱乔木, 李弘毅, 王子琪, 等. 基于长短期记忆网络的风电场发电功率超短期预测[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3796-3802.
ZHU Qiaomu, LI Hongyi, WANG Ziqi, et al. Short-term wind power forecasting based on LSTM [J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3796-3802.

作者简介:



郝广涛

郝广涛(1980—),男,山东烟台人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为大数据环境下人工智能在电力系统运行与控制中的应用(E-mail: haoguangtao@126.com);

韩学山(1959—),男,辽宁大连人,教授,博士,研究方向为电力系统分析与控制、检修与运行、电力市场等。

Concept, dispatch and control method, and application of aggregation grid based on panorama measurement

HAO Guangtao¹, HAN Xueshan², LIN Zhenheng¹, GUO Xiaojun¹, ZHANG Youquan³, ZHANG Xueqing⁴

(1. Key Laboratory of New Energy Equipment Detection of Fujian Universities, Putian University, Putian 351100, China;

2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University,

Jinan 250061, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250061, China;

4. State Grid Yantai Electric Power Company, Yantai 265400, China)

Abstract: With the renewable energy generation merging into each part of generation, transmission, distribution and use of power system, in order to maximize the absorption of renewable energy active power generation within the frequency limit, it is necessary to implement overall planning of their operation, dispatch and control. Therefore, a dispatch and control method for aggregation grid is given under the environment of panorama procedural measurement of power system. The concepts of aggregation grid, observable point, observable function and dispatch and control function of observable point are given, on this basis, the performance indexes of aggregation grid are given. The interaction among observable point, observable function and dispatch and control function of observable point are proposed to realize the gradual dispatch and control mechanism of aggregation grid. The case of online dispatch and control verifies the proposed method.

Key words: panorama procedural measurement; aggregation grid; observable point; observable function; dispatch and control function

附录 A:

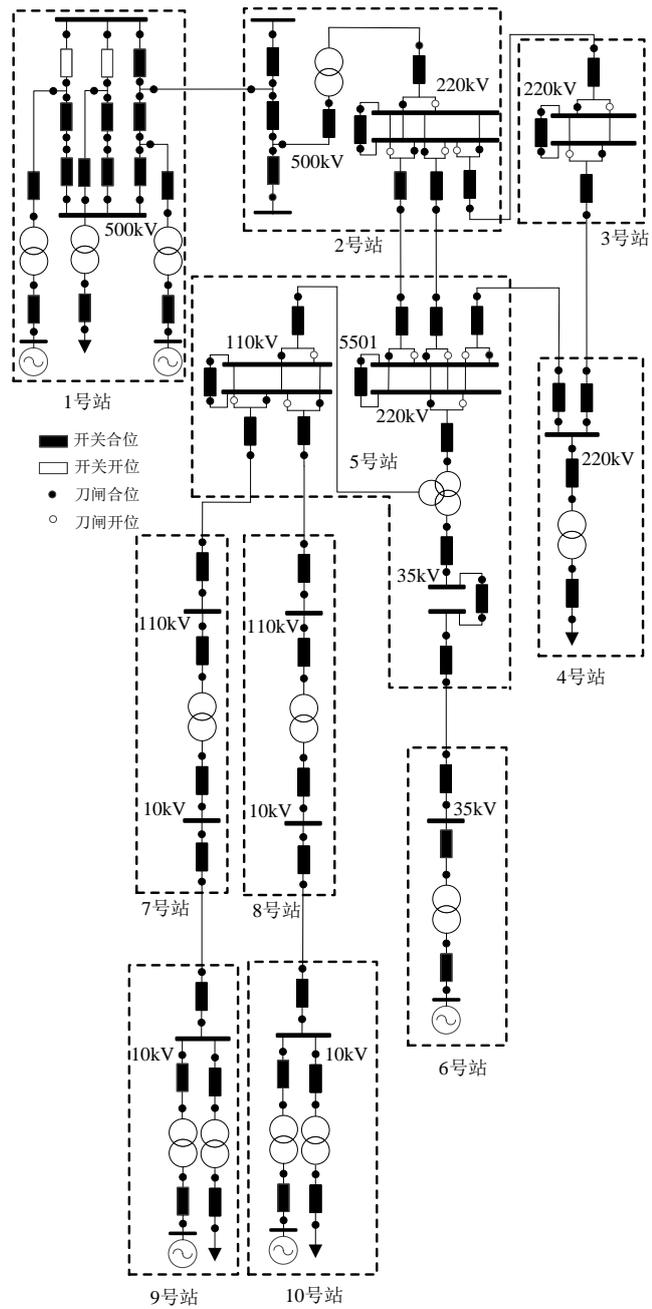


图 A1 某实际电力系统一次接线图

Fig.A1 Primary electric wiring diagram of a practical power system

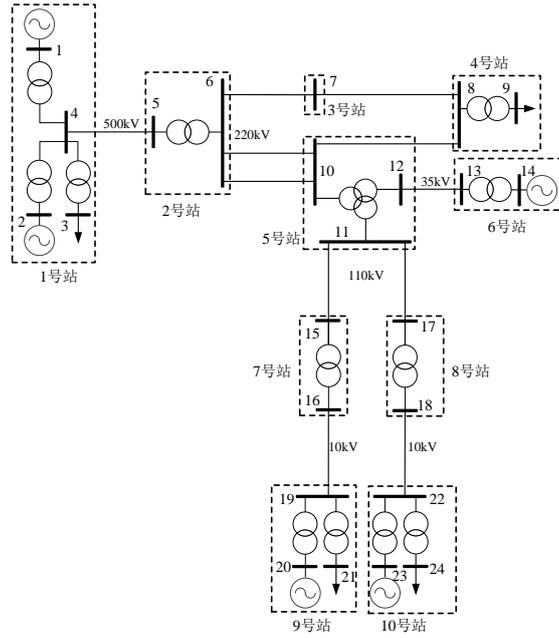


图 A2 拓扑分析结果

Fig.A2 Result of topology analysis

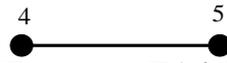


图 A3 500 kV 聚合电网

Fig.A3 500 kV aggregation grid

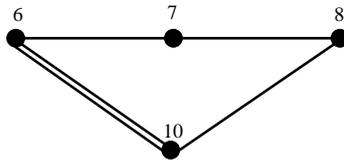


图 A4 220kV 聚合电网

Fig.A4 220 kV aggregation grid

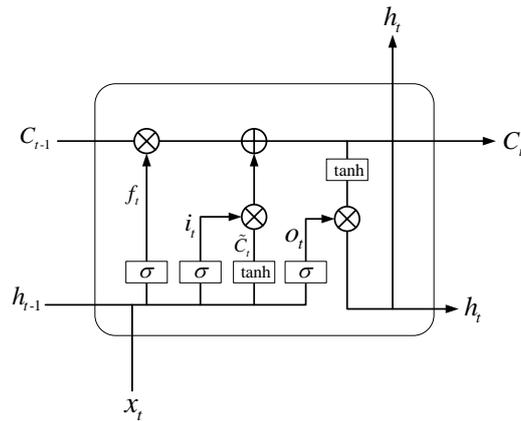


图 A5 LSTM 内部结构图

Fig.A5 Inner structure of LSTM

表 A1 山东 500 kV 聚合电网参数

Table A1 Parameters of 500 kV aggregation power grid in Shandong

线路	电阻	电抗	电纳/2	限值
1-4	0.000 500	0.006 580	0.413 438	22.7
1-14	0.001 582	0.015 748	0.972 956	22.7
2-3(双回线)	0.000 604	0.008 384	0.474 075	22.7
2-15(双回线)	0.000 530	0.007 356	0.416 194	22.7
3-4	0.000 689	0.007 232	0.402 413	22.7
3-7	0.001 000	0.010 489	0.582 947	22.7
3-11	0.000 746	0.007 829	0.434 109	22.7
4-5	0.001 007	0.010 566	0.587 081	22.7
4-8	0.000 419	0.004 395	0.243 928	22.7
5-6	0.001 121	0.015 556	0.879 244	22.7
5-9(双回线)	0.000 762	0.007 992	0.443 756	22.7
5-10	0.000 788	0.010 927	0.620 156	22.7
6-10	0.000 571	0.007 926	0.447 891	22.7
7-8	0.000 750	0.010 403	0.588 459	22.7
7-16	0.001 021	0.014 159	0.800 691	22.7
7-17(双回线)	0.000 700	0.009 730	0.547 116	22.7
7-18	0.000 905	0.014 570	0.527 822	22.7
8-9(双回线)	0.000 524	0.005 494	0.304 566	22.7
8-18	0.001 810	0.022 608	1.055 644	22.7
10-20(双回线)	0.000 609	0.008 459	0.476 831	22.7
11-14	0.000 577	0.006 058	0.336 262	22.7
12-19	0.000 766	0.010 657	0.599 484	22.7
12-13	0.000 684	0.009 491	0.536 091	22.7
13-20	0.000 639	0.008 865	0.500 259	22.7
18-19	0.000 346	0.004 810	0.270 112	22.7

注：表中数据为标么值。

表 A2 16 台发电机有功出力预测值与实际值的偏差

Table A2 Deviation between forecasted output and actual value of active power for sixteen generators

时刻	偏差/%															
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄	G ₁₅	G ₁₆
01:00	0.72	0.92	0.61	0.90	0.20	0.79	0.25	0.88	0.84	0.76	0.73	0.57	0.23	0.79	0.58	0.81
02:00	0.75	0.41	0.49	0.89	0.69	0.54	0.19	0.14	0.30	0.95	0.42	0.50	0.91	0.01	0.49	0.32
03:00	0.49	0.74	0.65	0.60	0.92	0.34	0.22	0.50	0.65	0.95	0.96	0.15	0.34	0.95	0.01	0.70
04:00	0.50	0.19	0.20	0.44	0.18	0.02	0.86	0.33	0.10	0.69	0.63	0.94	0.19	0.04	0.01	0.65
05:00	0.98	0.79	0.54	0.38	0.66	0.52	0.74	0.90	0.31	0.60	0.71	0.92	0.30	0.76	0.16	0.28
06:00	0.89	0.31	0.29	0.28	0.25	0.95	0.85	0.79	0.81	0.40	0.46	0.36	0.27	0.53	0.20	0.46
07:00	0.67	0.45	0.42	0.64	0.85	0.88	0.04	0.59	0.79	0.66	0.58	0.87	0.53	0.88	0.50	0.74
08:00	0.20	0.26	0.90	0.01	0.05	0.54	0.87	0.88	0.71	0.26	0.37	0.49	0.31	0.08	0.83	0.34
09:00	0.21	0.14	0.13	0.53	0.34	0.37	0.66	0.04	0.08	0.38	0.18	0.46	0.94	0.28	0.87	0.60
10:00	0.50	0.66	0.07	0.04	0.04	0.74	0.63	0.77	0.08	0.96	0.17	0.79	0.33	0.39	0.13	0.06
11:00	0.84	0.26	0.96	0.70	0.65	0.99	0.39	0.46	0.50	0.59	0.90	0.61	0.19	0.13	0.34	0.32
12:00	0.43	0.85	0.59	0.44	0.03	0.80	0.56	0.22	0.48	0.82	0.20	0.99	0.48	0.35	0.89	0.65
13:00	0.13	0.14	0.62	0.96	0.93	0.65	0.72	0.94	0.78	0.52	0.31	0.24	0.77	0.87	0.30	0.20
14:00	0.91	0.66	0.16	0.80	0.55	0.54	0.21	0.08	0.14	0.21	0.38	0.38	0.11	0.48	0.25	0.22
15:00	0.30	0.72	0.50	0.74	0.74	0.04	0.65	0.67	0.74	0.14	0.35	0.03	0.92	0.11	0.15	0.81
16:00	0.96	0.09	0.30	0.05	0.58	0.17	0.24	0.47	0.98	0.80	0.60	0.39	0.18	0.22	0.52	0.92
17:00	0.45	0.11	0.71	0.84	0.27	0.10	0.80	0.42	0.99	0.46	0.76	0.10	0.44	0.75	0.98	0.38
18:00	0.88	0.02	0.89	0.30	0.11	0.86	0.81	0.98	0.98	0.89	0.21	0.04	0.44	0.44	0.26	0.49
19:00	0.59	0.83	0.95	0.53	0.02	0.23	0.13	0.65	0.04	0.95	0.88	0.70	0.11	0.64	0.51	0.93
20:00	0.22	0.22	0.76	0.33	0.81	0.70	0.99	0.17	0.15	0.88	0.07	0.96	0.14	0.84	0.76	0.74
21:00	0.94	0.75	0.52	0.64	0.44	0.54	0.38	0.69	0.17	0.50	0.19	0.47	0.23	0.80	0.60	0.83
22:00	0.69	0.96	0.41	0.07	0.92	0.19	0.10	0.03	0.10	0.22	0.39	0.20	0.23	0.08	0.31	0.28
23:00	0.50	0.96	0.64	0.44	0.23	0.51	0.08	0.49	0.22	0.04	0.35	0.43	0.43	0.47	0.47	0.10
24:00	0.01	0.31	0.54	0.33	0.52	0.29	0.61	0.33	0.15	0.82	0.02	0.20	0.40	0.50	0.80	0.79