

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220147

基于全景可观的深度聚合电网模型、求解方法及其应用

郝广涛¹, 韩学山², 张逸³, 闻辉¹, 刁浩然⁴

(1. 莆田学院机电与信息工程学院, 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. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;
4. 中国南方电网调度控制中心, 广东 广州 510623)

摘要: 电力系统调度与控制正面临全局统筹、紧密协同的局面, 而对外部电网的等值简化是该决策顺利实施的前提和关键。由于传统等值简化方法对等值电网“源”“网”“荷”的增加或删减操作改变了其结构和主动量、被动量, 从而在电网全局统筹过程中, 使调度与控制的精度面临挑战。对此, 在电网全景可观环境下, 提出了深度聚合电网模型及其求解方法和应用。首先, 给出了发电厂、联络站的聚合方法, 形成聚合电网模型。并在此基础上, 将聚合厂站融合到输电线路, 建立了深度聚合电网模型。然后, 推导了深度聚合电网模型未知量与可调控量(发电机功率)之间的函数关系, 并使用长短期记忆网络对其参数进行求解。最后, 以经济调度应用为例进行仿真验证, 证明了所提方法的有效性。

关键词: 全景可观; 深度聚合电网; 聚合电网; 等值简化; 调度与控制

Model, solution method and application of a deep aggregated power grid based on panoramic observability

HAO Guangtao¹, HAN Xueshan², ZHANG Yi³, WEN Hui¹, DIAO Haoran⁴

(1. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, 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. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 4. China Southern Power Grid Electric Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Power system dispatching and control are facing a problem of overall planning and close coordination. The equivalent simplification of the external power grid is the premise and key to the smooth implementation of decision making. One of the key problems is the equivalent simplification of the power grid. In the traditional equivalent simplification method, the increase or deletion of "source", "network" and "load" of equivalent value power grid has changed its structure, active quantity and passive momentum. This makes the accuracy of dispatching and control face challenges in the process of global planning. Therefore, in the power grid panoramic environment, the deep aggregation power grid model, solution method and its application are proposed. First, the aggregation method of power plants and connecting stations is given to form an aggregated power grid model. Second, a deep aggregation power grid model is established by integrating power plants and stations into transmission lines. Third, the functional relationship between the unknown quantity and the adjustable quantity (generator power) of the deep aggregate power grid model is derived, and the long-term and short-term memory network is used to analyse its parameters. Finally, an economic dispatching application is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51477091).

Key words: panoramic observation; deep aggregated power grid; aggregated power grid; equivalent simplification; dispatch and control

0 引言

等值简化是电网经济调度与控制的基础^[1], 是

基金项目: 国家自然科学基金资助(51477091); 福建省自然科学基金资助(2020J01917); 莆田市科技计划资助项目(2022SZ3001ptxy01)

电网能量管理系统的核心。

传统电网经济调度与控制一直采取发电、输电、配电和用电分级、分离的方式, 即各级电网将上级(即高电压等级, 下同)电网等值简化为电源, 将下级(即低电压等级, 下同)电网等值简化为负荷, 由此在各级电网内实施集中的调度和控制策略^[2]。

在“碳达峰、碳中和”目标及相关政策驱动下,

可再生能源发电以分散、集中和微电网的形式大规模并入输配用各电压等级电网,使输电和配电网的界限逐渐模糊^[3]。为了安全、可靠、最大化地消纳可再生能源发电,无论是超前调度还是在线控制,必须统筹发输配用各电压等级电网^[4],建立实时、准确的外部电网(后文简称外网)等值简化模型是解决该问题的关键^[5]。

对此,国内外专家学者提出了许多卓有成效的方法,总体来说,可以分为两类:第一类是已知外网参数的拓扑等值法;第二类是外网参数未知的状态估计法。

对于第一类的研究来说,方法较多,相对较传统,主要包含 Ward 等值及其改进法^[6-8]、REI 等值及其改进法^[9-10]、戴维南诺顿等值及其改进法^[11-13]等。其研究思路是,已知外网“源”“网”“荷”一个状态下的参数,可以得到精度较高的外网等值参数,但当外网“源”“网”“荷”参数变化时,如何运用至其他状态下并保证外网等值模型的精度是目前备受挑战的课题。

对于第二类的研究来说,是针对部分已知或者完全未知外网“源”“网”“荷”参数展开的,是目前研究的热点和焦点。其思路是,基于内网的多个时间断面的 SCADA、WAMS 量测或者模拟计算来估算外网“源”“网”“荷”等值参数,如文献[14]使用 SCADA 在边界的量测数据,建立外网等值参数的最大、最小范围;文献[15]利用 PSASP 大量仿真数据结合内网电压稳定目标函数建立外网等值参数优化模型;文献[16]通过获取多种扰动的边界数据辨识外网等值参数;文献[17]指出黑箱外网的等值是解决互联电网潮流安全分析的关键,并通过模拟支路开断获得潮流灵敏度样本来估计外网等值参数;文献[18]通过跟踪外网等值导纳矩阵和量测残差来估计外网等值参数;文献[19]通过信号处理手段去除量测噪声,在量测窗口内使用微调技术补充量测数据并使用最小二乘方法估计外网参数。

综上,虽然目前对于外网等值简化方法已经取得了丰富的成果,但是这些等值简化方法新增或删除了外网部分主动量(如发电机有功功率、发电机无功功率、无功补偿设备出力等)和被动量(如负荷和网络结构等),从而在电网全局统筹调度与控制过程中,使其精准控制面临挑战。对此,本文在文献[20-21]所提全景可观环境下,基于文献[22]所提聚合电网概念的基础上,提出了深度聚合电网模型及其求解方法。

1 聚合电网模型

文献[22]提出了聚合电网的概念:电力系统是由若干电压等级的输配环节通过厂站和线路有机构

成的整体(如图 1 所示)。若将厂站视为聚集到线路一端的聚合厂站,则在某一电压等级下,若干聚合厂站及其关联的线路所构成的电网就是聚合电网。

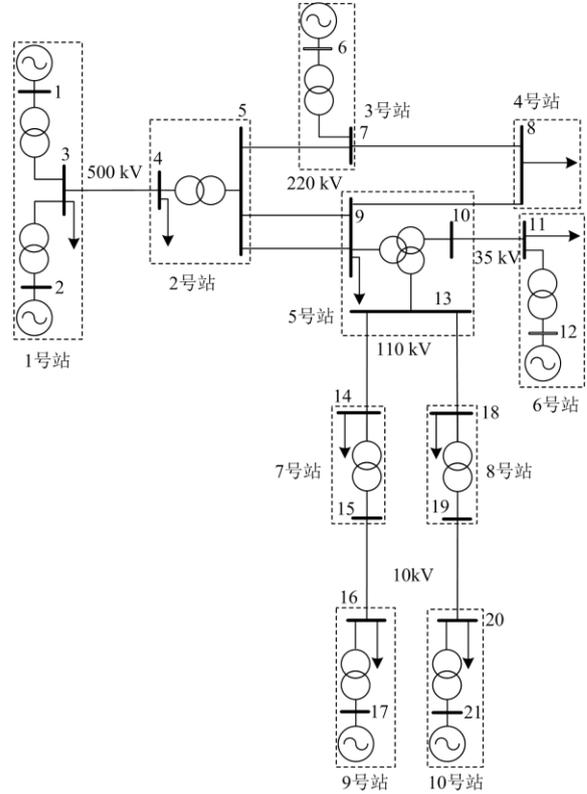


图 1 某实际电力系统

Fig. 1 An actual power system

据此概念,聚合电网形成的核心是建立聚合厂站模型。而据厂站在实际电力系统的位置和形成方式,可分为两类:一类是位于电力系统两端(即首端和末端)的发电厂(含可再生能源发电站)和变电站;另一类是位于电力系统中间的联络站。下面分别给出发电厂(含变电站)、联络站两种类型的聚合模型。

1.1 发电厂(含变电站)聚合模型

对于发电厂 k 来说,显然已知其主动量和被动量(变电站具有相同的分析方法),根据发电厂 k 内发电与用电的功率平衡关系, t 时刻发电厂 k 对外输出的有功功率 P_k^t 和无功功率 Q_k^t 表达式为

$$P_k^t + jQ_k^t = \left(\sum_{i=1}^{N_k} (P_{Gi}^t + jQ_{Gi}^t) + jQ_{kc}^t \right) - \left((P_{kd}^t + jQ_{kd}^t) + (P_{kl}^t + jQ_{kl}^t) \right) \quad (1)$$

式中: N_k 表示发电厂 k 的发电机总数; P_{Gi}^t 表示 t 时刻发电机 i 输出的有功功率; Q_{Gi}^t 表示 t 时刻发电机 i 输出的无功功率; Q_{kc}^t 表示 t 时刻发电厂 k 可投切无功补偿设备输出的无功功率; P_{kd}^t 表示 t 时刻发电

厂 k 的有功负荷; Q'_{kd} 表示 t 时刻发电厂 k 的无功负荷; P'_{kl} 表示 t 时刻发电厂 k 支路的有功线损; Q'_{kl} 表示 t 时刻发电厂 k 支路的无功线损。

将式(1)分别表示为有功和无功的形式, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} P'_k = \sum_{i=1}^{N_k} P'_{Gi} - P'_{kd} - P'_{kl} \\ Q'_k = \sum_{i=1}^{N_k} Q'_{Gi} + Q'_{kc} - Q'_{kd} - Q'_{kl} \end{cases} \quad (2)$$

假设 t 时刻为超前时刻, 要实现超前决策, 必须已知其内部主动量(P'_{Gi} 、 Q'_{Gi} 、 Q'_{kc})可调范围和被动量(P'_{kd} 、 Q'_{kd} 、 P'_{kl} 、 Q'_{kl})数值。

式(2)中的主动量(P'_{Gi} 、 Q'_{Gi} 、 Q'_{kc})对于发电厂 k 来说, 其可调控信息(如发电机有功、无功出力范围、爬坡速率等)显然是已知的; 有功负荷 P'_{kd} 和无功负荷 Q'_{kd} 可以通过 t 时刻的前一时刻 $t - \Delta t$ 的预测获得; 仅有支路上有功线损 P'_{kl} 和无功线损 Q'_{kl} 未知, 若将式(2)中 P'_{kl} 、 Q'_{kl} 表达为主动量的函数, 则式(2)形成了消除未知量、保留主动量以及对外参与电网调度与控制的聚合模型。

1.2 联络站的聚合模型

对于联络站 s 来说, 其位于电力系统不同电压等级电网之间, 起联络和协调作用^[20]。内部有发电、用电、流入的功率以及流出的功率 4 个部分, 根据这 4 个部分之间的功率平衡关系, 可得

$$\begin{cases} P'_{so} = P'_{sr} + \left(\sum_{i=1}^{N_s} P'_{Gi} - P'_{sd} - P'_{sl} \right) \\ Q'_{so} = Q'_{sr} + \left(\sum_{i=1}^{N_s} Q'_{Gi} + Q'_{sc} - Q'_{sd} - Q'_{sl} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P'_{so} 表示 t 时刻流出联络站 s 的有功功率; P'_{sr} 表示 t 时刻流入联络站 s 的有功功率; N_s 表示联络站内发电机总数; P'_{Gi} 表示 t 时刻发电机 i 输出的有功功率; P'_{sd} 表示 t 时刻联络站 s 的有功负荷; P'_{sl} 表示 t 时刻联络站 s 支路的有功线损; Q'_{so} 表示 t 时刻流出联络站 s 的无功功率; Q'_{sr} 表示 t 时刻流入联络站 s 的无功功率; Q'_{Gi} 表示 t 时刻发电机 i 输出的无功功率; Q'_{sc} 表示 t 时刻联络站 s 可投切无功补偿设备输出的无功功率; Q'_{sd} 表示 t 时刻联络站 s 的无功负荷; Q'_{sl} 表示 t 时刻联络站 s 支路的无功线损。

式(3)中流出联络站 s 的功率和流入联络站 s 的功率属于不同电压等级电网, 是多个电压等级电网

统筹协调时的分散协调量(即在某一电压等级电网的局部自治时, 其他电压等级的流出或流入功率可视为已知)。

由此可见, 式(3)中仅有有功线损 P'_{sl} 和无功线损 Q'_{sl} 未知, 若在超前 t 时刻将其表示为主动量的函数, 形成了消除未知量、保留主动量参与电网调度与控制的联络站聚合模型。

综合 1.1 节和 1.2 节, 由发电厂(含变电站)聚合模型式(2)、联络站聚合模型式(3)形成了聚合电网, 图 1 对应的聚合电网模型示意图如图 2 所示。

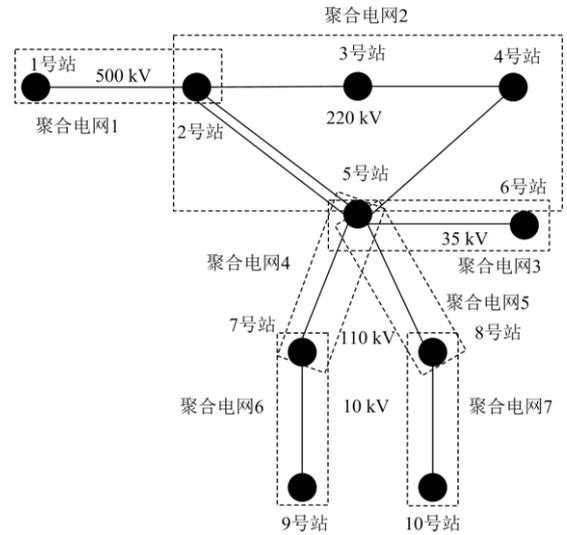


图 2 聚合电网模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of aggregated power grid

2 深度聚合电网模型

对于某些聚合电网来说, 在其长时间和过程化的运行中, 其输电线路有功功率和节点电压在任何场景下都不存在安全越限, 其实质是单母线模型。由此, 在超前的决策(如超前调度和控制)中可以与其相连的聚合厂站再次聚合, 形成深度聚合电网模型。

聚合电网按其在电力系统中的位置, 可分为两类: 一类位于首端和末端的聚合电网; 另一类位于中间的聚合电网, 本文分别称为源性(含荷性)聚合电网和联络性聚合电网, 下面分别给出其深度聚合模型。

2.1 源性聚合电网(含荷性)的深度聚合

对于源性聚合电网 K 来说(荷性与其相同, 只是主动量和被动量形式不同而已), 设其包含 m 个发电厂(含变电站)、 n 个联络站, 根据其发电、用电功率平衡关系, 可得 t 时刻该聚合电网 K 的深度聚合模型为

$$\begin{cases} P'_K = \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{N_k} P'_{Gi} - P'_{kd} \right) + \sum_{s=1}^n \left(\sum_{i=1}^{N_s} P'_{Gi} - P'_{sd} \right) - P'_{KL} \\ Q'_K = \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{N_k} Q'_{Gi} + Q'_{kc} - Q'_{kd} \right) + \\ \quad \sum_{s=1}^n \left(\sum_{i=1}^{N_s} Q'_{Gi} + Q'_{sc} - Q'_{sd} \right) - Q'_{KL} \end{cases} \quad (4)$$

式中： P'_K 表示 t 时刻流出聚合电网 K 的有功功率； P'_{KL} 表示 t 时刻聚合电网 K 的总有功线损，为厂站支路和线路有功线损之和； Q'_K 表示 t 时刻流出聚合电网 K 的无功功率； Q'_{KL} 表示 t 时刻聚合电网 K 的总无功线损，为厂站支路和线路无功线损之和。

由式(4)可见，其中仅有 P'_{KL} 和 Q'_{KL} 为未知量，若在超前 t 时刻将其表示为主动量的显函数，就可以形成保留主动量、消除未知量参与电网统筹调度与控制的深度聚合电网模型。

2.2 联络性聚合电网的深度聚合

对于联络性聚合电网 S 来说，设其包含 m 个发电厂(含变电站)、 n 个联络站，那么根据发电、用电功率平衡关系，可得 t 时刻该聚合电网 S 的深度聚合模型，如式(5)所示。

$$\begin{cases} P'_{SO} = P'_{SR} + \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{N_k} P'_{Gi} - P'_{kd} \right) + \sum_{s=1}^n \left(\sum_{i=1}^{N_s} P'_{Gi} - P'_{sd} \right) - P'_{SL} \\ Q'_{SO} = Q'_{SR} + \sum_{k=1}^m \left(\sum_{i=1}^{N_k} Q'_{Gi} + Q'_{kc} - Q'_{kd} \right) + \\ \quad \sum_{s=1}^n \left(\sum_{i=1}^{N_s} Q'_{Gi} + Q'_{sc} - Q'_{sd} \right) - Q'_{SL} \end{cases} \quad (5)$$

式中： P'_{SO} 表示 t 时刻流出聚合电网 S 的有功功率； P'_{SR} 表示 t 时刻流入聚合电网 S 的有功功率； P'_{SL} 表示 t 时刻聚合电网的总有功线损，为厂站支路和线路有功线损之和； Q'_{SO} 表示 t 时刻流出聚合电网 S 的无功功率； Q'_{SR} 表示 t 时刻流入聚合电网 S 的无功功率； Q'_{SL} 表示 t 时刻聚合电网 S 的总无功线损，为厂站支路和线路无功线损之和。

式(5)中流出聚合电网 S 的有功功率 P'_{SO} 和无功功率 Q'_{SO} 、流入聚合电网 S 的有功功率 P'_{SR} 和无功功率 Q'_{SR} 是电网全局统筹调度与控制过程中分散协调的量，即在某一聚合电网的局部自治时，其他聚合电网的流出或流入功率可视为已知，电网分散协调等深入的问题本文暂不讨论，将在后文中予以阐述。

由此可见，与式(2)—式(4)相同，式(5)中仅有 P'_{SL} 、 Q'_{SL} 为未知量，下面给出式(2)—式(5)中未知

量通用的求解方法。

3 模型求解方法

由前述可知，式(2)—式(5)中的未知量为有功线损和无功线损，若将这些未知量表达为发电机功率的函数，可以与式(2)—式(5)中对应的发电机功率合并，形成主动量、被动量全已知的模型。对于式(3)、式(5)中外部流入的功率需将其看作发电，流出的功率看作负荷。为了简洁、通用地给出函数关系，如下的求解过程省略了时刻 t 标签。

3.1 线损与发电机功率之间的函数关系

设某聚合(含聚合厂站和聚合电网，下同)内的节点总数为 N ，那么该聚合的总有功线损 P_L 、总无功线损 Q_L 可以表示为^[23]

$$S_L = P_L + jQ_L = \mathbf{I}^T \mathbf{Z}^T \mathbf{I}^* \quad (6)$$

式中： S_L 表示聚合内复功率线损； \mathbf{I} 表示聚合内节点注入电流相量的列向量， \mathbf{I}^T 为其转置， \mathbf{I}^* 为其共轭； \mathbf{Z} 表示聚合内节点阻抗矩阵， \mathbf{Z}^T 为其转置。

将式(6)中的节点注入 \mathbf{I} 表示为发电机节点和负荷节点两部分。

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_G + \mathbf{I}_D \quad (7)$$

式中： \mathbf{I}_G 表示发电机节点注入电流相量的列向量； \mathbf{I}_D 表示负荷节点注入电流相量的列向量。

一般来说，负荷节点 i 注入电流相量 \mathbf{I}_{Di} 与聚合内总负荷具有线性非一致性关系，如式(8)所示。

$$\mathbf{I}_{Di} = k_i \mathbf{I}_{DS} + \mathbf{I}_{i0} \quad (8)$$

式中： \mathbf{I}_{DS} 表示聚合内所有负荷节点电流相量和； k_i 表示线性复系数； \mathbf{I}_{i0} 表示随机数。

式(8)中 \mathbf{I}_{DS} 与负荷节点、发电机节点电流之间的关系为

$$\mathbf{I}_{DS} = \sum_{i=1}^{N_D} \mathbf{I}_{Di} = - \sum_{i=1}^{N_G} \mathbf{I}_{Gi} \quad (9)$$

式中： N_D 表示聚合内负荷节点总数； N_G 表示聚合内发电机节点总数； \mathbf{I}_{Gi} 表示发电机节点 i 注入的电流相量。

将式(9)代入式(8)并表示为矩阵形式，如式(10)所示。

$$\mathbf{I}_D = -\mathbf{K} \mathbf{I}_G + \mathbf{I}_0 \quad (10)$$

式中： \mathbf{I}_D 的元素为 $\mathbf{I}_{Di} (i=1,2,L,N_D)$ ；

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_1 & L & k_1 \\ k_2 & k_2 & L & k_2 \\ M & M & M & \\ k_{N_D} & k_{N_D} & L & k_{N_D} \end{bmatrix}_{N_D \times N_G} ; \quad \mathbf{I}_G \text{ 的元素为}$$

$\mathcal{I}_{G_i} (i=1,2,L,N_G)$; \mathbf{I}_0 表示由 $\mathcal{I}_{i0} (i=1,2,L,N_D)$ 组成的列向量。

将式(10)代入式(7)并合并同类项, 得

$$\mathbf{I} = (\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{I}_G + \mathbf{I}_0 \quad (11)$$

式中, \mathbf{E} 表示单位矩阵。

发电机节点注入电流相量 \mathcal{I}_{G_i} 与节点注入功率 S_{G_i} 、电压相量 \mathcal{V}_i 之间具有如式(12)所示的关系。

$$\mathcal{I}_{G_i} = \frac{P_{G_i} - jQ_{G_i}}{V_i^*} = \frac{S_{G_i}^*}{V_i^*} = A_{G_i} S_{G_i}^* + A_0 \quad (12)$$

式中: P_{G_i} 表示节点 i 注入的有功功率; Q_{G_i} 表示节点 i 注入的无功功率; V_i^* 表示节点 i 电压相量 \mathcal{V}_i 共轭; $S_{G_i}^*$ 表示 S_{G_i} 的共轭; A_{G_i} 表示线性化复系数; A_0 表示复偏置量。

将式(12)表示为矩阵形式, 得

$$\mathbf{I}_G = \mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \mathbf{A}_0 \quad (13)$$

式中: \mathbf{A}_G 表示由 $A_{G_i} (i=1,2,L,N_G)$ 为元素构成的复系数列向量; \mathbf{S}_G^* 表示由节点复功率共轭 $S_{G_i}^* (i=1,2,L,N_G)$ 组成的矩阵; \mathbf{A}_0 表示由节点偏置量 $A_0 (i=1,2,L,N_G)$ 构成的复偏置量矩阵。

将式(13)代入式(11)中, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= (\mathbf{E} - \mathbf{K})(\mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \mathbf{A}_0) + \mathbf{I}_0 = \\ &(\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + (\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_0 + \mathbf{I}_0 = \\ &(\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \mathbf{I}'_0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{I}'_0 = (\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_0 + \mathbf{I}_0$ 。

将式(14)代入式(6), 得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_L &= \mathbf{P}_L + j\mathbf{Q}_L = \mathbf{I}^T \mathbf{Z}^T \mathbf{I}^* = [(\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \mathbf{I}'_0]^T \mathbf{Z}^T \cdot \\ &[(\mathbf{E} - \mathbf{K})\mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \mathbf{I}'_0]^* = \\ &(\mathbf{S}_G^*)^T \mathbf{A}_G^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^* \mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + \\ &(\mathbf{S}_G^*)^T \mathbf{A}_G^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{I}'_0)^* + \\ &(\mathbf{I}'_0)^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^* \mathbf{A}_G \mathbf{S}_G^* + (\mathbf{I}'_0)^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{I}'_0)^* \end{aligned} \quad (15)$$

展开得

$$\begin{cases} P_L = \mathbf{P}_G^T \mathbf{B}'_{GG} \mathbf{P}_G + \mathbf{Q}_G^T \mathbf{B}'_{GG} \mathbf{Q}_G + \mathbf{P}_G^T (\mathbf{B}''_{GG} - \mathbf{B}'_{GG}) \mathbf{Q}_G + \\ \quad \mathbf{P}_G^T (\mathbf{B}''_{G0} + \mathbf{B}'_{G0}) + \mathbf{Q}_G^T (\mathbf{B}''_{G0} - \mathbf{B}'_{G0}) + \mathbf{B}''_{00} \\ Q_L = \mathbf{P}_G^T \mathbf{B}''_{GG} \mathbf{P}_G + \mathbf{Q}_G^T \mathbf{B}''_{GG} \mathbf{Q}_G + \mathbf{P}_G^T (\mathbf{B}'_{GG} - \mathbf{B}''_{GG}) \mathbf{Q}_G + \\ \quad \mathbf{P}_G^T (\mathbf{B}''_{G0} + \mathbf{B}'_{G0}) + \mathbf{Q}_G^T (\mathbf{B}'_{G0} - \mathbf{B}''_{G0}) + \mathbf{B}''_{00} \end{cases} \quad (16)$$

式中: \mathbf{P}_G 、 \mathbf{Q}_G 分别表示发电机节点有功功率列向量和无功功率列向量; 其他参数如式(17)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{GG} = \mathbf{B}'_{GG} + j\mathbf{B}''_{GG} = \mathbf{A}_G^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^* \mathbf{A}_G \\ \mathbf{B}_{G0}^* = \mathbf{B}'_{G0} + j\mathbf{B}''_{G0} = \mathbf{A}_G^T (\mathbf{E} - \mathbf{K})^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{I}'_0)^* \\ \mathbf{B}_{G0} = \mathbf{B}'_{G0} + j\mathbf{B}''_{G0} = (\mathbf{A}_G^T)^* \{(\mathbf{E} - \mathbf{K})^T\}^* \mathbf{Z} \mathbf{I}'_0 \\ \mathbf{B}_{00} = \mathbf{B}'_{00} + j\mathbf{B}''_{00} = (\mathbf{I}'_0)^T \mathbf{Z}^T (\mathbf{I}'_0)^* \end{cases} \quad (17)$$

式中, 上标*表示共轭。

若求解出上述各函数的系数, 就可以将式(2)一式(5)中的线损表达为发电机有功功率和无功功率的显函数, 进而得到相应的聚合模型。下面给出上述系数的求解方法。

3.2 基于长短期记忆网络求解系数

由式(16)可知, 该模型待求解系数较多, 为了获得精度高的解, 本文采用附录 A 中的长短期记忆网络(long short term memory, LSTM)予以求解。

LSTM 网络是由多个 LSTM 单元构成, 每个 LSTM 单元中的输入、输出都可以是多维数据矩阵, 从而实现从历史数据中进行学习的效果。基于此, 本文以历史 N 个时间断面(大于聚合内发电机数量)的潮流数据为基础, 求解式(16)参数, 其流程描述如下。

1) 基于历史 N 个时间断面的潮流数据, 以式(16)模型为对象, 将式(16)中 N_G 台发电机有功功率平方 $P_{G_i}^2$ 、发电机有功功率组合 $P_{G_i}, P_{G_j}, L, P_{G_k}$ 、发电机无功功率平方、无功功率组合 $Q_{G_i}, Q_{G_j}, L, Q_{G_k}$ 、有功功率组合 $P_{G_i}, P_{G_j}, L, P_{G_k}$ 与无功功率组合 $Q_{G_i}, Q_{G_j}, L, Q_{G_k}$ 发电机有功功率 P_{G_i} 、发电机无功功率 Q_{G_i} 作为输入, 其中 $i, j, k = 1, 2, L, N_G$ 、 $i \neq j \neq k$, 将对应的有功线损、无功线损作为输出, 形成训练集。

2) 将训练集中的输入数据输入到 LSTM 网络中, 得到预测值。根据预测值与真实值的误差利用反向传播算法对 LSTM 权值进行学习训练。

3) 经过训练, 可以获得式(16)中的系数。

4) 选择测试集中的输入数据和训练好的系数进行计算, 获得预测的有功线损、无功线损, 进而检验预测值效果。

4 算例仿真

本文以经济调度应用为例, 采用图 1 所示的某实际电网对所提算法进行仿真。该仿真系统包含 500 kV、220 kV、110 kV、35 kV、10 kV 多个电压等级电网, 由 10 个厂站(编号分别为 1 号站—10 号站)和 11 条输电线路构成, 其中 1 号站由 2 台发电

机组和负荷构成、2号站为联络站(内含负荷)、3号站有1台发电机组、4号站为纯负荷变电站、5号站为联络站(内含负荷)、6号站由1台发电机组和负荷构成、7号站和8号站为内含负荷的联络站、9号站由1台机组和负荷构成、10号站由1台机组和负荷构成。采用2019年6月1日至5日共5天、每天12h、每小时以2min为间隔,共计1800个潮流断面数据作为本文的研究基础。

使用Python的Keras建模编程环境对上述算法进行程序设计。建立的LSTM网络结构由两层LSTM、一层Dropout(防止过拟合)和一层Dense(全连接层)构成。其中,LSTM的核优化器采用Adam,损失函数使用均方误差(mean squared error, MSE),两层LSTM的隐含神经元个数为128、64,迭代次数设置为1500,学习率设置为0.03,输入层和输出层激活函数选择sigmoid函数。

4.1 聚合电网模型

以图1中1号站发电厂为例(变电站具有相同的方法),根据式(2)得厂站聚合模型式(A9)一式(A10)。

将式(A9)一式(A10)中的 $(P_{G1}^i)^2 + (Q_{G1}^i)^2$ 、 $P_{G1}^i P_{G2}^i + Q_{G1}^i Q_{G2}^i$ 、 $(P_{G2}^i)^2 + (Q_{G2}^i)^2$ 、 $P_{G1}^i Q_{G1}^i$ 、 $P_{G1}^i Q_{G2}^i$ 、 $P_{G2}^i Q_{G1}^i$ 、 $P_{G2}^i Q_{G2}^i$ 、 P_{G1}^i 、 P_{G2}^i 、 Q_{G1}^i 、 Q_{G2}^i 作为LSTM输入,同时将 P_{iL}^i 、 Q_{iL}^i 作为LSTM输出,分别选择50、100、150、200、250、300、350、400、450、500个潮流数据作为训练集,将对应的下一时刻潮流断面进行测试,结果如表1所示(误差计算如式(18)所示)。

表1 式(A9)一式(A10)参数在不同训练集下的测试结果

Table 1 Test results of parameters of equation (A9)–(A10) under different training sets

样本数	误差/%	
	有功线损	无功线损
50	1.6755	1.3572
100	1.1151	1.1587
150	0.8813	0.9142
200	0.7395	0.7641
250	0.6785	0.6257
300	0.5572	0.587
350	0.4973	0.5415
400	0.3248	0.4824
450	0.2730	0.3512
500	0.2221	0.3157

$$e = \left| \frac{y - f}{y} \right| \times 100\% \quad (18)$$

式中: e 表示误差; y 表示实际值; f 表示预测值。

由表1可见,有功、无功线损误差随着样本数增大而逐渐减小,在样本数为500时,有功、无功线损误差均在0.3%左右。

4.2 深度聚合电网模型

以图2所示的联络性聚合电网2为例,给出其深度聚合电网模型建立过程。聚合电网2中包含2号站(联络站)、3号站(内含1台发电机组)、4号站(变电站)和5号站(联络站)。聚合电网1通过2号站向聚合电网2送电,因此2号站注入功率等效为发电机功率。聚合电网2通过5号站向聚合电网3、聚合电网4、聚合电网5输送功率等效为负荷。因此,根据式(5),建立深度聚合电网2模型如附录A所示。

以式(A12)中的 $(P_{2R}^i)^2 + (Q_{2R}^i)^2$ 、 $P_{2R}^i P_{G3}^i + Q_{2R}^i Q_{G3}^i$ 、 $P_{2R}^i Q_{2R}^i$ 、 $(P_{G3}^i)^2 + (Q_{G3}^i)^2$ 、 $P_{2R}^i Q_{2R}^i$ 、 $P_{2R}^i Q_{G3}^i$ 、 $P_{G3}^i Q_{2R}^i$ 、 $P_{G3}^i Q_{G3}^i$ 、 P_{2R}^i 、 Q_{2R}^i 、 P_{G3}^i 、 Q_{G3}^i 作为LSTM输入, P_{2L}^i 和 Q_{2L}^i 作为LSTM输出,分别采用50~500个样本进行训练,以对应后一时刻潮流数据进行测试,结果如表2所示。

由表2可见,随着训练样本数增大,有功、无功线损误差逐渐下降,当样本数为500时,有功、无功线损误差均在0.3%左右。

表2 式(A12)参数在不同训练集下的测试结果

Table 2 Test results of parameters of equation (A12) under different training sets

样本数	误差/%	
	有功线损	无功线损
50	1.6557	1.8569
100	1.2357	1.3262
150	1.0491	1.0771
200	0.8340	0.9035
250	0.6087	0.8748
300	0.5577	0.6971
350	0.4431	0.5302
400	0.3922	0.4144
450	0.3645	0.3787
500	0.3012	0.3316

4.3 经济调度应用验证

以前述7200个潮流断面负荷为基础,对图1所示的电网采用文献[24]计及有功线损的安全经济调度方法进行计算(发电机成本系数如表3所示,发电机有功功率上下限如表4所示,输电线路均未达到限值),获得对应时间的600个样本作为实际值。

选择前500个样本,按4.1节形成聚合电网1—7,对其进行经济调度检验。

首先,对具有代表性的聚合电网1进行验证。选取第501个样本中的负荷,对本文形成的聚合电

网 1 实施计及有功线损的安全经济调度。同时, 采用文献[10,14,17]中的方法将图 1 中的 500 kV 电网作为内网, 其他作为外网实施等值, 进行计及有功线损的安全经济调度, 对比结果如表 5 所示。

表 3 图 1 中发电机成本系数

Table 3 Generator cost factor in Figure 1

厂站	发电 机组	系数		
		二次项	一次项	常数项
1 号站	1 号	0.000 002 339	-0.003 292	94.52
	2 号	0.000 002 339	-0.003 292	94.52
6 号站	1 号	-0.000 030 89	0.025 99	8.641
9 号站	1 号	0.000 0397 9	-0.044 05	10.07
10 号站	1 号	0.000 124 1	-0.1305	12.68

表 4 发电机有功功率上下限

Table 4 Upper and lower limits of generator active power

厂站	发电机组	发电机有功功率/MW	
		上限	下限
1 号站	1 号	1000	0
	2 号	1000	0
3 号站	1 号	600	0
6 号站	1 号	350	0
9 号站	1 号	150	0
10 号站	1 号	150	0

表 5 图 1 中 500 kV 电网安全经济调度计算结果

Table 5 Calculation results of safe and economic dispatching of 500 kV power grid in Figure 1

方法	1 号站发电机有功线损误差/%	
	机组 1	机组 2
文献[10]	0.3584	0.3584
文献[14]	0.4261	0.4261
文献[17]	0.3478	0.3478
本文	0.2316	0.2316

为了进一步对其进行验证, 选择图 1 中的 220 kV 电网作为内网, 其他电压等级电网为外网, 依次使用文献[10,14,17]中的方法和本文方法对外网实施等值(本文采用深度聚合), 并进行计及有功线损的安全经济调度, 所得结果如表 6 所示。

表 6 图 1 中 220 kV 电网安全经济调度计算结果对比

Table 6 Comparison of safe and economic dispatching calculation results of 220 kV power grid in Figure 1

方法	3 号站发电机有功线损误差/%
文献[10]	0.4587
文献[14]	0.5622
文献[17]	0.4159
本文	0.3261

由表 6 可见, 本文方法比其他方法的误差小, 但是表 6 中各种方法的误差明显比表 5 所对应误差偏大。通过分析发现, 文献[10]在对 500 kV 电网等值时, 采用线损灵敏度建立等值发电机模型, 本质上是一种线性模型, 与实际的非线性模型具有一定误差; 文献[14]采用数据样本时间间隔较大的 SCADA 数据建立模型, 误差较大; 文献[17]本质上与文献[14]相似, 也是采用线性等值模型。

5 结论

电力系统实施全局统筹调度与控制的基础是建立准确的等值简化模型。对此, 本文提出了深度聚合电网模型, 并以经济调度应用为例进行验证, 得到如下结论:

- 1) 所提出的聚合电网模型、深度聚合电网模型符合实际电网。
- 2) 使用 LSTM 网络对聚合电网、深度聚合电网模型进行求解是可行的, 能够获得精度较高的解。
- 3) 以经济调度应用为例, 对聚合电网、深度聚合电网模型进行验证, 表明了所提模型的有效性。

本文从最基本的角度提出了聚合电网、深度聚合电网模型及其求解方法。在此基础上, 下一步将深入研究该理论, 如聚合电网、深度聚合电网分散协同的调度与控制方法等, 使该研究更贴近实际, 便于发挥理论的指导作用。

附录 A

LSTM 是循环神经网络的一种, 具有记忆历史信息并从中学习规律的能力, 其单元结构如图 A1 所示。

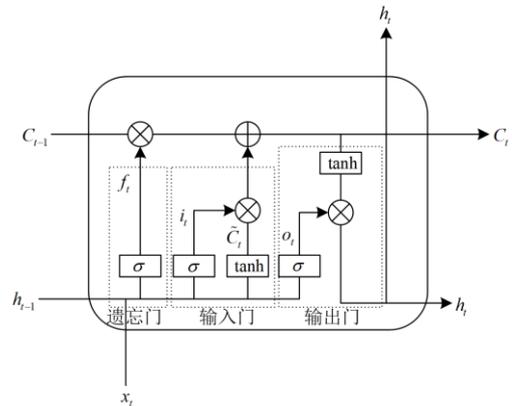


图 A1 LSTM 内部结构

Fig. A1 Structure of LSTM

由图 A1 可见, LSTM 包含遗忘门、输入门和输出门 3 个门控单元, 其计算方式如下所述。

- 1) LSTM 单元通过遗忘门接收当前输入信息 x_t

和前一时刻隐含信息 h_{t-1} ，通过激活函数 σ 的过滤获得输出 f_t 。

$$f_t = \sigma(w_{fx}x_t + w_{fh}h_{t-1} + b_f) \quad (A1)$$

式中： w_{fx} 和 w_{fh} 表示遗忘门权值； b_f 表示偏置量。

2) 输入门过滤当前输入信息 x_t 、前一时刻隐含信息 h_{t-1} ，获得过滤值 i_t 和新知识 \mathcal{C}_t^0 。

$$\begin{cases} i_t = \sigma(w_{ix}x_t + w_{ih}h_{t-1} + b_i) \\ \mathcal{C}_t^0 = \tanh(w_{cx}x_t + w_{ch}h_{t-1} + b_c) \end{cases} \quad (A2)$$

式中： w_{ix} 、 w_{ih} 、 w_{cx} 、 w_{ch} 表示输入门权值； b_i 和 b_c 表示偏置量； σ 表示激活函数。

3) 通过过滤值 i_t 和新知识 \mathcal{C}_t^0 ，得到 t 时刻更新信息 C_t 。

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \mathcal{C}_t^0 \quad (A3)$$

由 C_t 获得输出当前状态 h_t ：

$$\begin{cases} o_t = \sigma(w_{ox}x_t + w_{oh}h_{t-1} + b_o) \\ h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \end{cases} \quad (A4)$$

式中： w_{ox} 、 w_{oh} 表示输出门权值； b_o 表示偏置量。

4) 通过过滤输出当前状态信息 h_t ，得到 LSTM 网络的输出值。

$$y_t = \sigma(w_y h_t + b_y) \quad (A5)$$

式中： w_y 表示权值； b_y 表示偏置量。

$$\begin{cases} P_1^t = \sum_{i=1}^2 P_{Gi}^t - P_{ld}^t - P_{lL}^t \\ Q_1^t = \sum_{i=1}^2 Q_{Gi}^t - Q_{ld}^t - Q_{lL}^t \end{cases} \quad (A6)$$

式中： P_1^t 表示 t 时刻 1 号站输出的有功功率； P_{ld}^t 表示 t 时刻 1 号站的有功负荷； P_{lL}^t 表示 t 时刻 1 号站的有功线损； Q_1^t 表示 t 时刻 1 号站输出的无功功率； Q_{ld}^t 表示 t 时刻 1 号站的无功负荷； Q_{lL}^t 表示 t 时刻 1 号站的无功线损；其他符号与前文相同。

式(A6)中的未知量为 P_{lL}^t 和 Q_{lL}^t ，根据式(16)，建立未知量与 1 号站 2 台发电机之间的函数关系：

$$\begin{aligned} P_{lL}^t &= \begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{G1}^t \\ P_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} Q_{G1}^t & Q_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{G1}^t \\ Q_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{G1}^t \\ Q_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{G1}^t & Q_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} + e_1 \end{aligned} \quad (A7)$$

式中， $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$ 、 e_1 为待求系数。

$$\begin{aligned} Q_{lL}^t &= \begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{G1}^t \\ P_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} Q_{G1}^t & Q_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{G1}^t \\ Q_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} \\ b'_{21} & b'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{G1}^t \\ Q_{G2}^t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} P_{G1}^t & P_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c'_1 \\ c'_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{G1}^t & Q_{G2}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \end{bmatrix} + e'_1 \end{aligned} \quad (A8)$$

式中： $\begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} \\ b'_{21} & b'_{22} \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} c'_1 \\ c'_2 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \end{bmatrix}$ 、 e'_1 为待求系数。

将式(A7)、式(A8)展开并合并同类项得：

$$\begin{aligned} P_{lL}^t &= a_{11}\{(P_{G1}^t)^2 + (Q_{G1}^t)^2\} + a_1\{P_{G1}^t P_{G2}^t + Q_{G1}^t Q_{G2}^t\} + \\ &a_{22}\{(P_{G2}^t)^2 + (Q_{G2}^t)^2\} + b_{11}P_{G1}^t Q_{G1}^t + \\ &b_{12}P_{G1}^t Q_{G2}^t + b_{21}P_{G2}^t Q_{G1}^t + b_{22}P_{G2}^t Q_{G2}^t + \\ &c_1 P_{G1}^t + c_2 P_{G2}^t + d_1 Q_{G1}^t + d_2 Q_{G2}^t + e_1 \end{aligned} \quad (A9)$$

式中， $a_1 = a_{12} + a_{21}$ 。

$$\begin{aligned} Q_{lL}^t &= a'_{11}\{(P_{G1}^t)^2 + (Q_{G1}^t)^2\} + a'_1\{P_{G1}^t P_{G2}^t + Q_{G1}^t Q_{G2}^t\} + \\ &a'_{22}\{(P_{G2}^t)^2 + (Q_{G2}^t)^2\} + b'_{11}P_{G1}^t Q_{G1}^t + \\ &b'_{12}P_{G1}^t Q_{G2}^t + b'_{21}P_{G2}^t Q_{G1}^t + b'_{22}P_{G2}^t Q_{G2}^t + \\ &c'_1 P_{G1}^t + c'_2 P_{G2}^t + d'_1 Q_{G1}^t + d'_2 Q_{G2}^t + e'_1 \end{aligned} \quad (A10)$$

式中， $a'_1 = a'_{12} + a'_{21}$ 。

$$\begin{cases} P_{20}^t = P_{2R}^t + P_{G3}^t - P_{2d}^t - P_{2L}^t \\ Q_{20}^t = Q_{2R}^t + Q_{G3}^t - Q_{2d}^t - Q_{2L}^t \end{cases} \quad (A11)$$

式中： P_{20}^t 表示 t 时刻通过 5 号站流出聚合电网 2 的有功功率； P_{2R}^t 表示 t 时刻通过 2 号站流入聚合电网 2 的有功功率； P_{G3}^t 表示 t 时刻 3 号站发电机发出的无功功率； P_{2d}^t 表示 t 时刻聚合电网 2 中总有功负荷，为 2 号站、4 号站、5 号站有功负荷之和； P_{2L}^t 表示 t 时刻聚合电网 2 中总有功线损； Q_{20}^t 表示 t 时刻通过 5 号站流出聚合电网 2 的无功功率； Q_{2R}^t 表示 t 时刻通过 2 号站流入聚合电网 2 的无功功率； Q_{G3}^t 表示 t 时刻 3 号站发电机发出的无功功率； Q_{2d}^t 表示 t 时刻聚合电网 2 中总无功负荷，为 2 号站、4 号站、

5号站无功负荷之和; Q'_{2L} 表示 t 时刻聚合电网 2 中总无功线损。

式(A11)中的未知量为 P'_{2L} 和 Q'_{2L} , 根据式(16), 建立未知量与 P'_{2R} 和 P'_{G3} 、 Q'_{2R} 和 Q'_{G3} 之间的函数关系如式(A12)所示。

$$\begin{cases} P'_{2L} = a\{(P'_{2R})^2 + (Q'_{2R})^2\} + b\{P'_{2R}P'_{G3} + Q'_{2R}Q'_{G3}\} + \\ c\{(P'_{G3})^2 + (Q'_{G3})^2\} + dP'_{2R}Q'_{2R} + \\ eP'_{2R}Q'_{G3} + fP'_{G3}Q'_{2R} + gP'_{G3}Q'_{G3} + \\ hP'_{2R} + iQ'_{2R} + jP'_{G3} + kQ'_{G3} + s \\ Q'_{2L} = a'\{(P'_{2R})^2 + (Q'_{2R})^2\} + b'\{P'_{2R}P'_{G3} + Q'_{2R}Q'_{G3}\} + \\ c'\{(P'_{G3})^2 + (Q'_{G3})^2\} + d'P'_{2R}Q'_{2R} + \\ e'P'_{2R}Q'_{G3} + f'P'_{G3}Q'_{2R} + g'P'_{G3}Q'_{G3} + \\ h'P'_{2R} + i'Q'_{2R} + j'P'_{G3} + k'Q'_{G3} + s' \end{cases} \quad (A12)$$

式中, $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, s$ 和 $a', b', c', d', e', f', g', h', i', j', k', s'$ 表示待求系数。

参考文献

- [1] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [2] 朱炳铨, 郭逸豪, 郭创新, 等. 信息失效威胁下的电力信息物理系统安全评估与防御研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 178-187.
ZHU Bingquan, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A survey of the security assessment and security defense of a cyber physical power system under cyber failure threat[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 178-187.
- [3] 张彼德, 陈颖倩, 李孟洁, 等. 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 106-114.
ZHANG Bide, CHEN Yingqian, LI Mengjie, et al. Research on an operational optimization method of multi-energy complementary micro energy grid with heat pump and phase change energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 106-114.
- [4] 余涛, 程乐峰, 张孝顺. 基于信息-物理-社会系统融合和群体机器学习的弱中心化微元网: 理论研究与关键科学问题分析[J]. 中国科学: 技术新科学, 2019, 49(12): 1541-1569.
- [5] YU Tao, CHENG Lefeng, ZHANG Xiaoshun. The weakly-centralized web-of-cells based on cyber-physical-social systems integration and group machine learning: theoretical investigations and key scientific issues analysis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(12): 1541-1569.
- [6] MHANNA S, VERBIĆ G, CHAPMAN A. C. Adaptive ADMM for distributed AC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2025-2035.
- [7] 李世明, 卢建刚, 王茜, 等. 外网扩展电压源支路 Ward 等值模型及其在状态估计中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 76-84.
LI Shiming, LU Jiangan, WANG Qian, et al. Extended voltage-source-branch ward-equivalent-circuit model of external network and its application in state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 76-84.
- [8] 刘佳, 元一平, 万凌云, 等. 电网最优负荷消减的动态校正域及 Ward 等值模型[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(2): 42-51.
LIU Jia, YUAN Yiping, WAN Lingyun, et al. Dynamic correction area and ward equivalent model for optimal load curtailment in power system[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42 (2): 42-51.
- [9] 许海, 杨尚瑾, 金雪芬, 等. 基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 104-110.
XU Hai, YANG Shangjin, JIN Xuefen, et al. A method to implement Ward equivalent based on power flow calculation and short circuit calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 104-110.
- [10] 杨金刚, 李顺昕, 赵炜炜, 等. 电网可靠性评估的网络静态等值模型分析[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(4): 35-43.
YANG Jingang, LI Shunxin, ZHAO Weiwei, et al. Network static equivalent model for power system reliability evaluation[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(4): 35-43.
- [11] 王方雨, 刘文颖, 李潇, 等. 考虑线损灵敏度一致性的外网静态等值模型[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2295-2302.
WANG Fangyu, LIU Wenyong, LI Xiao, et al. Static equivalent model of external network considering the consistency of line loss sensitivity[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2295-2302.
- [12] 赵建伟, 严正, 徐潇源, 等. 戴维南等值参数时域仿真跟踪算法分析与改进[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 115-122.
ZHAO Jianwei, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, et al. Analysis

- and improvement of Thevenin equivalent parameter tracking based on time-domain simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 115-122.
- [12] 李东东, 杨银台, 程云志, 等. 基于虚拟相量直线的戴维南等值参数计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 132-138.
LI Dongdong, YANG Yintai, CHENG Yunzhi, et al. Calculation method of Thevenin equivalent parameters based on virtual line in phasor space[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 132-138.
- [13] YUN Zhihao, CUI Xinhui, MA Kaigang. Online Thevenin equivalent parameter identification method of large power grids using LU factorization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4464-4475.
- [14] 肖健, 甘明, 刘有志, 等. 基于量测数据的外部电网在线等值实用方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 157-163.
XIAO Jian, GAN Ming, LIU Youzhi, et al. Practical online equivalent method for external grid based on measurement data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 157-163.
- [15] 朱革兰, 盛建兰. 考虑电压支撑的新能源发电网的外网等值建模[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1-7.
ZHU Gelan, SHENG Jianlan. Equivalent modeling of external network in new energy power grid taking voltage support into consideration[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(7): 1-7.
- [16] 陈厚合, 王为超, 姜涛, 等. 基于数据驱动的电力系统动态等值方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3047-3056.
CHEN Houhe, WANG Weichao, JIANG Tao, et al. Data-driven dynamic equivalence method in bulk power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3047-3056.
- [17] 颜伟, 王茜, 卢建刚, 等. 基于支路开断模拟的双端口黑箱外网静态等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3154-3162.
YAN Wei, WANG Qian, LU Jiangan, et al. Black-box static equivalent method of two-port external network based on branch outage simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3154-3162.
- [18] ÂNGELOS E W S, ABUR A, ASADA E N, et al. External topology tracking based on state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2623-2631.
- [19] BAEZEGKAR-NTOVOM G A, PAPAPOPOULOS T A, KONTIS E O. Robust framework for online parameter estimation of dynamic equivalent models using measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2380-2389.
- [20] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283.
ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283.
- [21] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2885-1894.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. The concept of intelligent panoramic system and its application system in modern power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2885-1894.
- [22] 郝广涛, 韩学山, 林振衡, 等. 基于全景量测的聚合电网概念、调控方法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 187-193.
HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIN Zhenheng, et al. Concept, dispatch and control method, and application of aggregation grid based on panorama measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 187-193.
- [23] 杨毅刚, 任国樑, 周全仁, 等. 电力系统综合损失系数法的理论与应用[J]. 中国电机工程学报, 1985, 5(3): 1-8.
YANG Yigang, REN Guoliang, ZHOU Quanren, et al. Theory and application of complex loss formula coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 1985, 5(3): 1-8.
- [24] 李文沅. 电力系统安全经济运行-模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-05-23

作者简介:

郝广涛(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为大数据环境下能源互联的分散经济调度理论; E-mail: haoguangtao@126.com

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

(编辑 姜新丽)