

DOI: 10.7667/PSPC151627

基于多层次启发式动态规划算法的电力系统动态等值

杜治¹, 苏宇², 彭昌勇¹, 姚伟², 徐敬友¹, 刘巨², 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对电力系统运行工况变化后动态等值系统响应精度不够的问题, 提出一种基于多层次启发式动态规划(Global representation heuristic dynamic programming, GrHDP)算法的动态等值方法。该方法在基于同调等值得到的模型的基础上, 在等值边界上加入基于 GrHDP 算法的动态补偿环节, 实时补偿同调等值系统与原系统间动态特性的差额, 从而实现精确跟踪原系统的动态特性。以 10 机 39 节点系统为例进行仿真研究, 结果表明: 在不同运行工况、故障方式和故障地点下, 基于所提算法的动态等值系统相比传统的同调等值能更精确地跟踪原系统的动态特性。

关键词: 电力系统; 动态等值; 同调等值法; 多层次启发式动态规划; 动态特性

Dynamic equivalent of power system based on global representation heuristic dynamic programming algorithm

DU Zhi¹, SU Yu², PENG Changyong¹, YAO Wei², XU Jingyou¹, LIU Ju², WEN Jinyu²

(1. State Grid HBEPCC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient response accuracy for dynamic equivalence system after power system operating conditions change, this paper proposes a global representation heuristic dynamic programming (GrHDP)-based dynamic equivalence method. Based on the model obtained by coherency equivalents method, a dynamic compensation block based on GrHDP is added to the boundary of the equivalent model, which can compensate the dynamic response difference between the equivalent system and the original system. Therefore, it can accurately track the original system dynamic characteristics. Case study is undertaken on a 10-machine 39-bus power system. Simulation results show that the equivalent model obtained by proposed dynamic equivalence method can more accurately track the original system dynamic characteristics than that obtained by the coherency equivalents method under different operating conditions and fault locations.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51529701).

Key words: power system; dynamic equivalents; coherency equivalents method; GrHDP; dynamic characteristic

0 引言

随着全网同步电力系统规模的不断扩大, 对其进行分析所需要的计算量随之加大, 系统动态行为也越发复杂, 这对电力系统安全稳定计算和分析都提出了巨大的挑战^[1-7]。然而, 在对大型系统进行分析的过程中, 一般只对某一局部感兴趣, 称之为研究系统, 而对其余外部的系统, 可以在保留对内部系统动态影响基本不变的情况下做适当的简化处理。

这种简化过程即为电力系统动态等值, 其能够在保证计算精度的前提下, 极大降低系统复杂度, 减少运算量, 方便进行系统分析^[8-9]。此外, 如果一个区域内存在一个小水电机组数目众多的小水电机群, 其作为一个整体对主网动态特性的影响不容忽视。在分析主网的动态特性时, 需要对小水电机群进行动态等值建模以避免采用详细建模可能出现的计算“维数灾”和难以获得如此众多的单台小水电机组的实际参数等问题^[10]。

电力系统动态等值的方法主要分为三类: 同调等值法, 模式等值法和估计等值法^[11]。同调等值一

般用于暂态稳定分析，通过将动态响应相近的一群机组等效为一台机组，再对网络进行一定的化简，等效外部集群机组的动态特性。目前已有文献开始将其用于大规模风电场等值^[12-13]。然而，同调等值法是一种经验性的方法，缺乏理论推导，并且易受限于扰动发生的位置^[14-15]。模式等值则是完全基于系统线性化动态方程进行推导，通过筛选保留必要的振荡模式，适合于小干扰仿真计算，并且不受扰动位置的影响^[16-17]。但是，模式等值法的等值结果为并无物理意义的方程，不能与现有的计算软件兼容，并且在计算大系统时会出现“维数灾”问题^[18]。同调等值和模式等值均属于离线等值，需要完整的网络及动态参数，而估计等值则基于辨识技术，通过拟合系统响应曲线求取外部系统特性参数，能够适用于在线分析^[11]。文献[18]采用一种改进的差分进化算法进行估计等值，结果能够较为准确地反应系统动态特性。上述三种等值方法对电力系统稳定分析均起到了积极的作用。不过，上述现有等值方法均存在难以适应不同工况或扰动的缺点^[15, 19]。

多层次启发式动态规划(GrHDP)算法是在常规启发式动态规划(heuristic dynamic programming, HDP)基础上提出的一种全新的动态规划算法，该模型增加了一个目标网络^[20-21]。目标网络利用其自适应性建立了内部多层次、多阶段的目标函数，指导评价网络实现最优控制策略。该算法具有很强的学习能力和自适应性，在系统完整参数和详细模型未知的情况下，通过离线训练、在线修正的方式逐渐“学习”系统的基本特性，不断调整控制策略，最终实现最优控制^[22-23]。该算法目前已经应用于风电场稳定控制、同步发电机控制、柔性交流输电系统装置控制等领域，并得到了很好的控制效果，具有很强的适应性^[24-26]。

本文在传统的同调等值算法的基础上，提出了一种基于 GrHDP 的动态等值方法，该方法是在等值边界上加入一个基于 GrHDP 算法的补偿环节，通过该环节实时补偿原系统与同调等值系统的误差，能够精确跟踪原系统的动态特性。以新英格兰 10 机 39 节点系统为测试算例，分析结果表明：基于 GrHDP 的动态等值算法能实时跟踪系统的动态响应，在系统运行工况、故障方式发生变化的情况下，该等值算法始终能跟踪系统的动态响应，比同调等值算法具有更好的鲁棒性。

1 基于 GrHDP 的动态等值的原理

自 19 世纪 60 年代动态等值的概念被提出之后，形成了两种主流的电力系统等值思路：“白箱法”和

“黑箱法”。前者是在已知被等值系统内部电网的详细参数情况下，通过同调等值等方法对系统进行参数聚合和网络化简^[14]，具有等值精度较高，计算简单的特点，但其完全依赖于被等值系统的详细模型结构与参数，难以应对电网运行工况的变化，只适用于离线等值；后者只根据被等值区域电网对外联络线上的电压、功率等信号通过参数辨识或者模式识别的方法对被研究区域进行等值^[27]，具有不依赖于被等值区域电网的系统参数，适合电力系统在线等值的特点，但其计算复杂，参数不可完全辨识。基于此，本文提出了一种将这两种方法结合在一起的电力系统等值方法，称之为“灰箱法”。即通过对电网某一运行工况下的系统参数进行同调等值，得到被等值系统的基本模型，然后结合在线数据，基于 GrHDP 算法对同调等值模型存在的误差进行在线校正，其具体的实现示意图如图 1 所示。

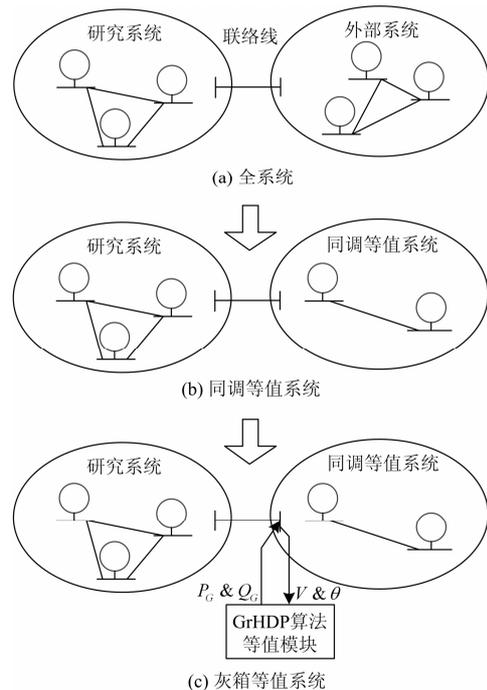


图 1 基于 GrHDP 算法的等值系统结构图

Fig. 1 Block diagram of equivalent system based on GrHDP

2 基于 GrHDP 的动态等值方法

2.1 同调等值算法简述

同调等值法是目前电力系统广泛采用的一种等值方法，其基本思路如下^[12-13]：

(1) 根据实际情况，将系统划分为需要保留的研究系统和需要等值的外部系统，两部分之间以联络线相连，外部系统中连接联络线的节点为边界节点，如图 1(a)所示。

(2) 根据电气距离，将外部系统的所有发电机划

分为若干个同调机群, 并将每个同调机群等值为一台等值机。

(3) 将属于同一同调机群的发电机等效移置至新引入的等值节点, 消去原有的发电机节点, 并将网络中的负荷也等效移置至等值节点。

(4) 对移置至等值节点的同调发电机进行参数聚合, 得到等值发电机的参数。

(5) 保留外部系统的边界节点及等值节点, 对剩余网络进行化简, 消去其他中间节点, 得到等值网络。

经上述步骤, 可得到由等值发电机和等值负荷组成的外部系统动态等值模型, 如图 1(b)所示。

2.2 基于 GrHDP 的修正

GrHDP 算法是一种基于 HDP 的最优控制算法, 其特点是在 HDP 两层神经网络的基础上增加一个参考网络。参考网络能根据初始外部强化函数, 产生更加精确的内部强化函数, 以便于得到更精确的控制信号。GrHDP 系统由三个部分组成: 评价网络(Critic Network), 执行网络(Action Network)和参考网络(Reference Network)。下面对三个网络的结构进行介绍^[22]。将执行网络、参考网络、评价网络和动态系统组合起来就得到了基于多层次动态规划算法的系统, 其结构如图 2 所示。

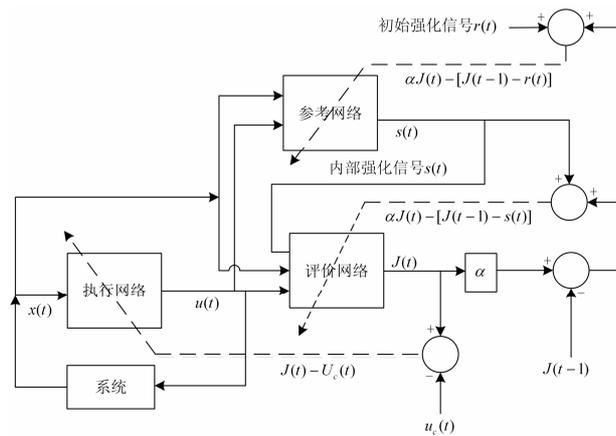


图 2 GrHDP 系统结构图

Fig. 2 Structure of GrHDP system

如图 2 所示, 动态系统状态反馈量 $x(t)$ 分别输入到三神经网络中: 执行网络根据 $x(t)$ 形成控制量 $u(t)$; 参考网络根据 $x(t)$ 和 $u(t)$ 形成内部强化信号 $s(t)$, 与初始外部强化信号 $r(t)$ 相比, $s(t)$ 具有更强的适应性和精确性; 评价网络根据 $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $s(t)$ 形成性能指标函数 $J(t)$ 。GrHDP 算法通过对各层神经网络内部权值的自适应调整, 从而形成一个最优控制序列 $u(t)$, 使得性能指标函数 $J(t)$ 取得最小值。

2.2.1 评价网络

评价网络输出性能指标函数 $J(t)$, GrHDP 算法的控制目标是使得 $J(t)$ 最小。无论是评价网络、执行网络还是参考网络, 均是含有隐含层的前馈神经网络, 各网络权值的更新均采用误差反向传播(Back Propagation, BP)规则^[20]。评价网络的结构如图 3 所示。

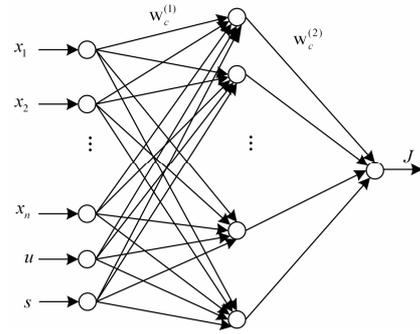


图 3 评价网络结构图

Fig. 3 Structure of critic network

评价网络的误差函数定义为

$$e_c(t) = \alpha J(t) - [J(t-1) - s(t)] \quad (1)$$

$$E_c(t) = \frac{1}{2} e_c^2(t) \quad (2)$$

其中, α 为折扣因子, 根据式(1)和式(2)计算网络误差, 若超过误差容限, 就根据采用梯度下降法^[21]更新评价网络的权值, 即权值在更新的过程中沿误差下降最快的负梯度方向变化, 以保证 $J(t)$ 得到最快的更新和保证系统快速达到最优控制目标。

权值的更新规则使用链式规则, 即

$$\frac{\partial E_c(t)}{\partial w_c(t)} = \frac{\partial E_c(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial w_c(t)} \quad (3)$$

具体的权值更新算法为

$$\Delta w_{c_j}^{(2)}(t) = l_{c_j}(t) \left[-\frac{\partial E_c(t)}{\partial w_{c_j}^{(2)}(t)} \right] \quad (4)$$

$$w_{c_j}(t+1) = w_{c_j}(t) + \Delta w_{c_j}(t)$$

其中, w_{c_j} 和 Δw_{c_j} 分别为评价网络的权值和权值的变化量, 评价网络的学习率 $l_{c_j}(t) > 0$, 保证误差总是向着减小的方向变化。

2.2.2 执行网络

执行网络输出为控制信号序列 $u(t)$, 使动态系统获得最优的控制效果。执行网络的权值更新方法是通过性能指标函数的期望输出 U_c 和性能指标函数 $J(t)$ 的差反馈来间接实现的。目标期望 U_c 取 0, 通过权值的动态调整, $J(t)$ 就能趋向于目标期望, 取得最小值 0。执行网络的结构如图 4 所示。

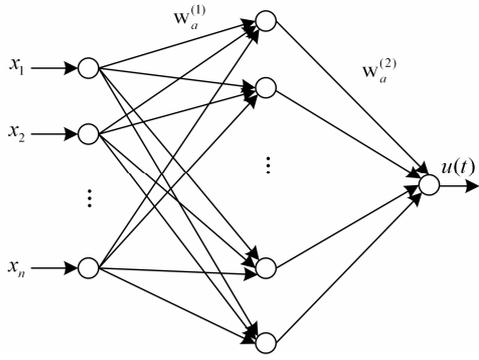


图4 执行网络结构图

Fig. 4 Structure of action network

执行网络的误差函数定义为

$$e_a(t) = J(t) - U_c(t) \quad (5)$$

$$E_a(t) = \frac{1}{2} e_a^2(t) \quad (6)$$

权值更新仍然采用链式规则, 相关的方程如下:

$$\frac{\partial E_a(t)}{\partial w_a(t)} = \frac{\partial E_a(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial w_a(t)} \quad (7)$$

相关的权值更新算法为

$$\Delta w_{a_i}(t) = l_a(t) \left[-\frac{\partial E_a(t)}{\partial w_{a_i}(t)} \right] \quad (8)$$

$$w_{a_i}(t+1) = w_{a_i}(t) + \Delta w_{a_i}(t)$$

其中, $w_{a_{ij}}$ 和 $\Delta w_{a_{ij}}$ 分别为执行网络权值和权值的变化量, 执行网络的学习率 $l_a(t) > 0$, 保证误差总是向着减小的方向变化。

2.2.3 参考网络

参考网络用于产生精确的内部强化函数, 进而得到精确的性能指标函数, 给出更精确的控制策略, 最终提高系统的控制精度和收敛速度。参考网络的结构如图5所示。

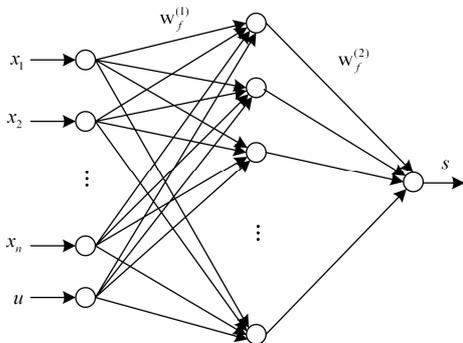


图5 参考网络结构图

Fig. 5 Structure of reference network

误差函数定义为

$$e_f(t) = \alpha J(t) - [J(t-1) - r(t)] \quad (9)$$

$$E_f(t) = \frac{1}{2} e_f^2(t) \quad (10)$$

链式更新方法的相关方程为

$$\frac{\partial E_f(t)}{\partial w_f(t)} = \frac{\partial E_f(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial w_f(t)} \quad (11)$$

权值更新算法为

$$\Delta w_{f_i}(t) = l_f(t) \left[-\frac{\partial E_f(t)}{\partial w_{f_i}(t)} \right] \quad (12)$$

$$w_{f_i}(t+1) = w_{f_i}(t) + \Delta w_{f_i}(t)$$

其中, $w_{f_{ij}}$ 、 $\Delta w_{f_{ij}}$ 分别为参考网络权值及其变化量, 参考网络学习率 $l_f(t) > 0$ 。

为使权值在合理的范围内, 要在计算过程中对其进行归一化。计算方法为

$$\begin{aligned} w_c(t+1) &= \frac{w_c(t) + \Delta w_c(t)}{\|w_c(t) + \Delta w_c(t)\|_1} \\ w_a(t+1) &= \frac{w_a(t) + \Delta w_a(t)}{\|w_a(t) + \Delta w_a(t)\|_1} \\ w_f(t+1) &= \frac{w_f(t) + \Delta w_f(t)}{\|w_f(t) + \Delta w_f(t)\|_1} \end{aligned} \quad (13)$$

3 算例分析

3.1 算例简介

以如图6(a)所示的新英格兰10机39节点系统为例进行算例分析^[28], 整个系统分为上半部分的研究系统和下半部分的外部系统。根据电气距离法, 可将外部系统分为同调的外部系统1和外部系统2。在本算例中, 将外部系统2作为外部系统进行等值, 并进行仿真验证。将外部系统2经等值之后整个系统如图6(b)所示。

3.2 基于GrHDP的电力系统动态等值模块设计

由于外部系统2的边界节点为节点14和节点17, 采用如图7所示的基于GrHDP的等值系统模型, 其中输入量 $x(t)$ 选取节点14和17的电压幅值偏差 $\Delta V_{14}(t)$ 、 $\Delta V_{17}(t)$ 和相角偏差 $\Delta \delta_{14}(t)$ 、 $\Delta \delta_{17}(t)$, 输出量 $u(t)$ 选取有功调整量 $\Delta P(t)$ 和无功调整量 $\Delta Q(t)$, 如图6(b)所示, GrHDP模块输出的有功和无功调整量通过等值发电机 G_{eq} 所在的母线注入电网, 用来调整联络线14-15和16-17的有功、无功误差。初始强化信号为

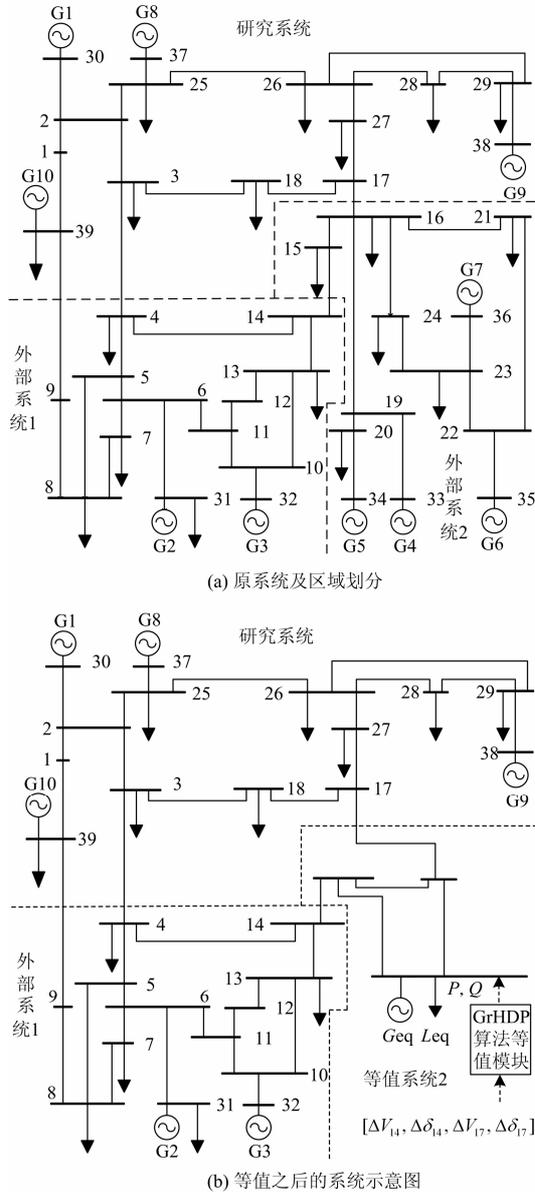


图 6 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 6 New England 10-machine 39-bus system

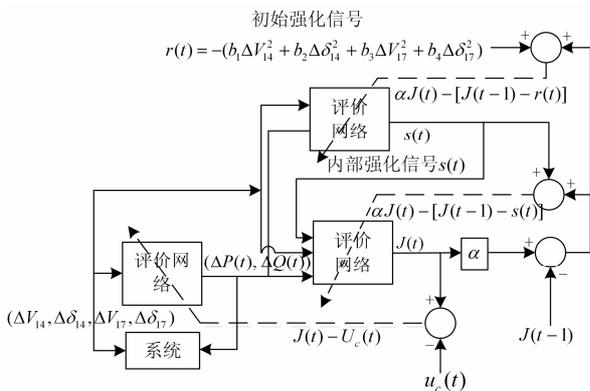


图 7 基于 GrHDP 的动态补偿模块结构图

Fig. 7 Structure of the GrHDP-based dynamic compensation block

$$r(t) = -(b_1 \Delta V_{14}^2 + b_2 \Delta \delta_{14}^2 + b_3 \Delta V_{17}^2 + b_4 \Delta \delta_{17}^2)$$

其中, b_1, b_2, b_3, b_4 分别为 $\Delta V_{14}, \Delta \delta_{14}, \Delta V_{17}, \Delta \delta_{17}$ 平方的权值, 取 $b_1=b_3=1, b_2=b_4=0.6$, 学习率 $l_a=l_c=0.3$, GrHDP 补偿模块中三个网络的参数如表 1 所示。

表 1 GrHDP 补偿模块参数

Table 1 Parameters of the GrHDP compensation block

网络	参考网络	评价网络	执行网络
输入变量	5	6	4
输出变量	1	1	2
隐层节点数	6	6	6
激活函数	正弦型	正弦型	正弦型

基于 GrHDP 的动态等值系统应用于在线控制前, 需要先对基于 GrHDP 的控制器进行离线训练, 再将训练好的等值系统应用于在线控制^[24]。训练的标准工况为: 在外部系统 2 通过联络线 14-15 和 16-17 向其余部分传输的有功功率之和为 2.38 p.u.(也就是 238 MW)时, 3 号节点在 $t=5$ s 时发生三相短路故障, 持续时间为 0.1 s。后文中外部系统 2 传输的基准功率选为 2.38 p.u。

具体的训练步骤如下:

- (1) 设计合适的初始强化函数, 并设计训练的终止条件。
- (2) 将各个网络的权值初始化。
- (3) 将系统状态 $\Delta V=[\Delta V_{14}, \Delta \delta_{14}, \Delta V_{17}, \Delta \delta_{17}]$ 输入执行网络, 通过目标函数最小化, 得到系统的有功调整量 $\Delta P(t)$ 和无功调整量 $\Delta Q(t)$ 。
- (4) 将有功调整量 $\Delta P(t)$ 和无功调整量 $\Delta Q(t)$ 输入到系统得到下一时刻系统状态 $\Delta V(t+1)$, 将其输入控制器, 产生下一时刻输出序列 $\Delta P(t+1)$ 和 $\Delta Q(t+1)$ 。

(5) 评价网络根据式(4)更新它的权值, 直到满足评价网络的评判条件。

(6) 执行网络根据式(8)更新它的权值, 直到满足执行网络的评判条件。

(7) 参考网络根据式(12)更新它的权值, 直到满足参考网络的评判条件。

(8) 如同时满足步骤(5)~(7), 则输出控制结果, 并保留各网络权值; 如不满足返回步骤(3)继续计算。

3.3 仿真分析

为验证所提 GrHDP 等值方法的有效性和自适应性, 分别进行不同工况下短路故障、断线故障以及不同故障位置的对比仿真分析。

3.3.1 不同运行工况下短路故障对比

为表征等值系统与原系统的偏离程度，定义等值系统的偏离度 I 为

$$I = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^t [b_1 (V_{ij}(t) - V_{0ij}(t))^2 + b_2 (\delta_{ij}(t) - \delta_{0ij}(t))^2] \quad (14)$$

其中： $V_{ij}(t)$ 、 $V_{0ij}(t)$ 分别是等值系统和原系统节点 j 在 i 时刻的实时电压； $\delta_{ij}(t)$ 、 $\delta_{0ij}(t)$ 分别是等值系统和原系统节点 j 在 i 时刻相对于 10 号机组的相对功角； b_1 、 b_2 是权值系数。

在 $t=5$ s 时，在 3 号节点发生三相短路故障，持续时间为 0.1 s，改变外部系统 2 的传输功率，各种工况下在 $t=30$ s 时偏离度如图 8 所示。

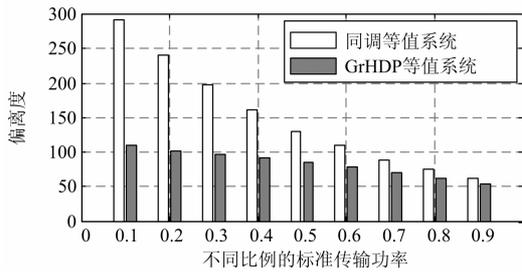
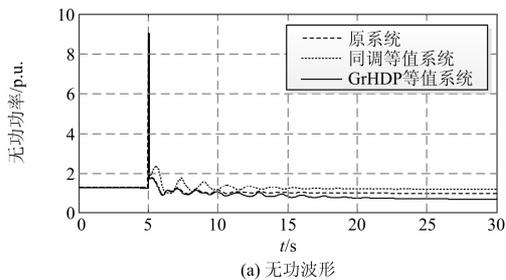


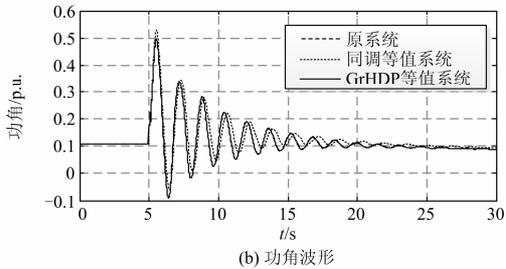
图 8 不同传输功率下在 $t=30$ s 时的偏离度(短路故障)

Fig. 8 Deviation index at $t=30$ s under different transmission power (short circuit fault)

为更直观地观察两种等值方法的动态等值效果，本文给出当传输功率为 0.9 倍和 0.2 倍基准输出功率时，系统分别采用同调等值和所提等值方法等值之后，发电机 1 无功和功角的响应曲线分别如图 9 和 10 所示。



(a) 无功波形

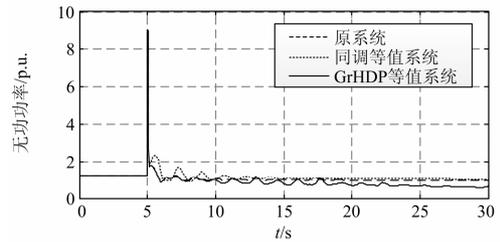


(b) 功角波形

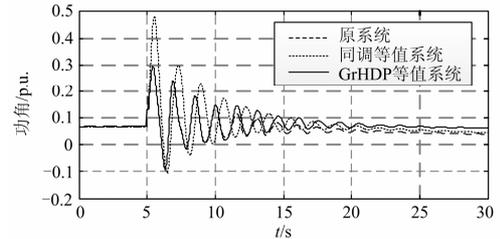
图 9 1 号发电机动态特性对比(0.9 倍基准传输功率)

Fig. 9 Dynamic characteristic comparison diagram of #1 generator (0.9 base transmission power)

从图 8~图 10 可以看出：当传输功率与训练工况接近时，同调等值系统能跟踪原系统的动态特性；当传输功率发生较大变化时，同调等值系统的功角曲线先出现较大波动，随后出现波动周期与原系统波动周期不同步的现象。基于 GrHDP 的动态等值系统能始终跟踪原系统的动态变化，验证了该等值方法的有效性和自适应性。另一方面，通过偏离度值看出，对于同调等值系统，偏离度随传输功率的减小而增大，且增长速度越来越快，说明同调等值只对训练工况控制较好，随着系统实际运行工况与训练工况相差越来越大，同调等值系统的控制效果也越来越差。基于 GrHDP 的等值系统随传输功率的减小，偏离度略微增长，说明无论运行工况如何变化，输出波形的波动较小，验证了所提基于 GrHDP 等值方法具有良好的鲁棒性。



(a) 无功波形



(b) 功角波形

图 10 1 号发电机动态特性对比(0.2 倍基准传输功率)

Fig. 10 Dynamic characteristic comparison diagram of #1 generator (0.2 base transmission power)

3.3.2 不同运行工况下断线故障对比

仿真工况为： $t=5$ s 时，传输功率为 1.0 p.u.，线路 3-4 发生永久性断线故障。改变外部系统 2 的传输功率，各种工况下 $t=30$ s 时偏离度如图 11 所示。

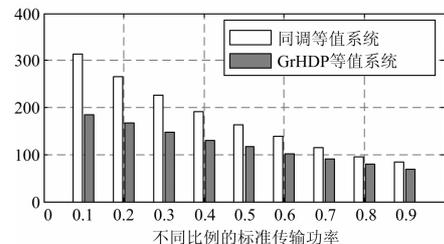


图 11 不同传输功率下在 $t=30$ s 时的偏离度(断线故障)

Fig. 11 Deviation index at $t=30$ s under different transmission power (line outage fault)

可以看出: 对于同调等值系统, 偏离度会随传输功率的减小而不断增大, 且增长的速度越来越快, 说明同调等值法只对训练工况控制效果较好。随着仿真工况与训练工况相差越来越大, 同调等值系统控制效果越来越差, 而基于 GrHDP 的等值系统偏离度略微增长, 说明无论运行工况如何变化, 输出波形波动较小, 验证了该方法良好的鲁棒性。为直观观察等值效果, 选取当传输功率分别为 0.9 倍和 0.2 倍基准输出功率时, 对应的发电机 1 的动态响应如图 12 和图 13 所示, 可以看出, 当传输功率与训练工况接近时, 尽管在仿真过程中电压存在小幅波动, 同调等值法还是能够跟踪原系统的动态特性。但当传输功率与训练工况相差较大时, 同调等值法的电压先是出现飞升, 而且随着时间的推移变得越来越大。而基于 GrHDP 的动态等值算法无论是训练工况还是与训练工况相差较大的运行工况, 均能够跟踪原系统的动态变化, 验证了该等值方法的有效性和自适应性。

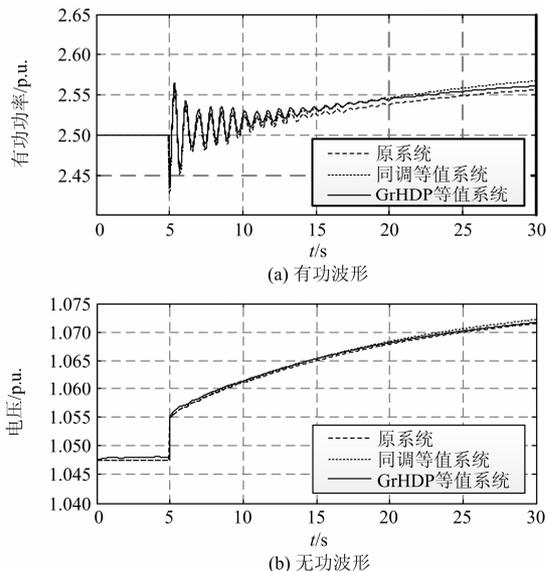


图 12 1 号机动态特性对比(0.9 倍基准传输功率)

Fig. 12 Dynamic characteristic comparison diagram of #1 generator (0.9 base transmission power)

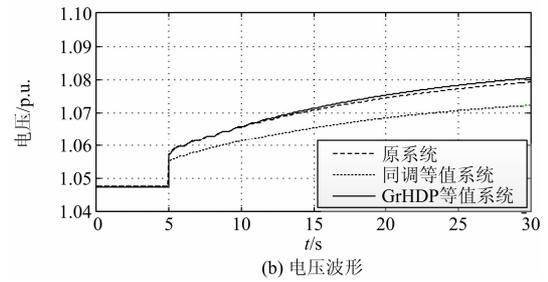
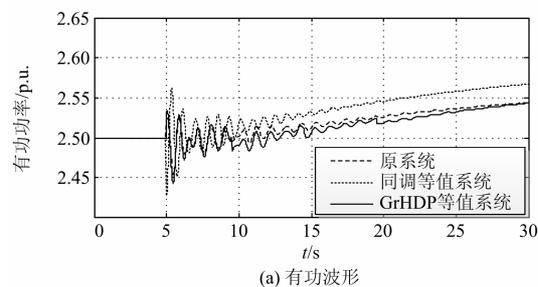


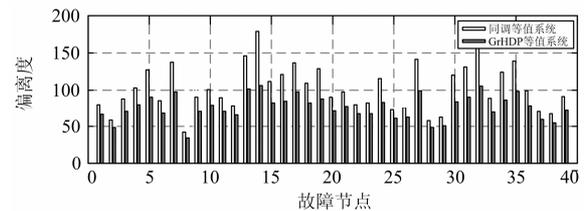
图 13 1 号机动态特性对比(0.2 倍基准传输功率)

Fig. 13 Dynamic characteristic comparison diagram of #1 generator (0.2 base transmission power)

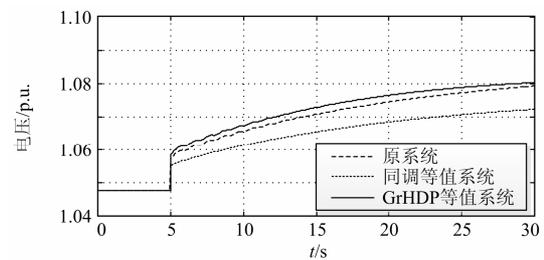
3.3.3 不同故障地点

为进一步证明基于 GrHDP 的动态等值系统的自适应性, 针对不同故障地点进行对比仿真试验。

仿真工况为: 在 $t=5$ s 时, 发生持续时间为 0.1 s 的三相瞬时短路故障, 外部系统 2 对外的传输功率为 0.7 倍基准输出功率。改变故障地点, 观察同调等值系统, 基于 GrHDP 的动态等值系统的等值效果, 两个等值系统对应在 $t=30$ s 时的偏离度如图 14 所示, 可以看出基于 GrHDP 的等值效果要比同调等值效果好。

图 14 不同故障地点下在 $t=30$ s 时偏离度对比Fig. 14 Deviation indices at $t=30$ s under different fault locations

为了更直观地观察等值效果, 本文选取某一故障点情况下的等值效果进行对比, 等值系统响应如图 15 所示, 可以看出: 当某一故障地点的偏离度与训练工况的偏离度相近时(如 8 号节点), 尽管电压存在波动, 同调等值法和基于 GrHDP 的动态系统均能跟踪系统的动态特性。但当某一故障地点故障的偏离度与训练工况的偏离度相差较大时(如 14 号节点), 同调等值法的电压出现较大的变化, 而基于



(a) 14号节点电压波形

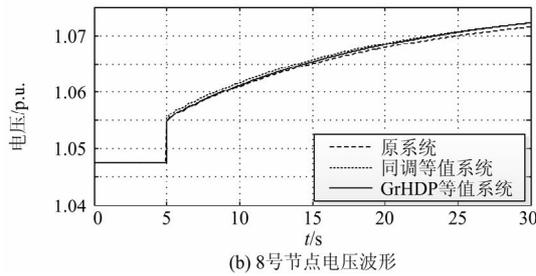


图 15 不同故障地点下动态特性波形

Fig. 15 Dynamic characteristic curves of different fault locations

GrHDP 的等值系统仍能跟踪原系统电压的变化。以上的对比仿真证明了基于 GrHDP 的动态等值系统的有效性和自适应性。

4 总结

本文提出一种基于同调等值和多层次启发式动态规划(GrHDP)的动态等值算法以解决传统动态等值算法在电力系统运行工况大幅变化时无法精确跟踪系统动态特性的问题。在 10 机 39 节点系统中,将其与同调等值系统进行对比仿真,结果表明:在同调等值系统无法跟踪原系统动态特性的工况下,基于 GrHDP 的动态等值系统能实时跟踪原系统的动态响应,验证了该算法的有效性。在原系统的运行工况、故障方式和故障地点发生变化的情况下,与基于同调等值的系统相比,本文所提基于 GrHDP 的动态等值系统始终能跟踪原系统的动态响应,具有较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 张一获, 管霖. 交直流互联电网动态等值的实用化方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 120-125.
ZHANG Yidi, GUAN Lin. Practical dynamic equivalence of AC-DC interconnected power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 120-125.
- [2] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [3] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.
ZHAO Hongshen, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.
- [4] 熊凌飞, 韩民晓, 姚蜀军. 锁相环对多端柔性直流稳

- 定性作用分析及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 203-212.
- XIONG Lingfei, HAN Minxiao, YAO Shujun. Influence of PLL on the stability analysis of VSC-MTDC and parameter selection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 203-212.
- [5] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84-91.
LI Yanghai, HUANG Ying, LIU Ju, et al. Power system oscillation source location based on damping torque analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 84-91.
- [6] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈邦特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [7] 艾小猛, 韩杏宁, 文劲宇, 等. 考虑风电爬坡事件的鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 188-195.
AI Xiaomeng, HAN Xingning, WEN Jinyu, et al. Robust unit commitment considering wind power ramp events[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 188-195.
- [8] 翁华, 徐政. 一种考虑短路电流指标的动态等值方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 85-90.
WENG Hua, XU Zheng. Dynamic equivalence based on short circuit current index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 85-90.
- [9] 李晓辉, 罗敏, 刘丽霞, 等. 动态等值新方法及其在天津电网中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 61-66.
LI Xiaohui, LUO Min, LIU Lixia, et al. A new dynamic equivalence method and its application in Tianjin grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 61-66.
- [10] 王敏, 文劲宇, 胡文博, 等. 区域小水电机组动态等值建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 1-9.
WANG Min, WEN Jinyu, HU Wenbo, et al. A dynamic equivalent modeling for regional small hydropower generator group[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 1-9.
- [11] 鞠平, 王卫华, 谢宏杰, 等. 3 区域互联电力系统动态等值的辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 29-34.
JU Ping, WANG Weihua, XIE Hongjie, et al. Identification approach to dynamic equivalents of the power system interconnect with three areas[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2007, 27(13): 29-34.
- [12] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [13] 蒙晓航, 叶林, 赵永宁. 永磁直驱同步风电场多机动态等值模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 25-32.
MENG Xiaohang, YE Lin, ZHAO Yongning. Dynamic multi-machine equivalent model of direct drive permanent magnet synchronous generators of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 25-32.
- [14] 倪向萍, 梅生伟. 基于复杂网络社团结构理论的同调等值算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 10-14.
NI Xiangping, MEI Shengwei. Coherency-based dynamic equivalence algorithm with community structure of complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 10-14.
- [15] 李健, 陈涵, 李大路. 电力系统动态等值研究方法综述[J]. 广东电力, 2007, 20(2): 1-4.
LI Jian, CHEN Han, LI Dalu. Review on methods of dynamic equivalents in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(2): 1-4.
- [16] UNDRILL J M, TURNER A E. Construction of power system electromechanical equivalents by modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(5): 2049-2059.
- [17] 张宝珍. 大规模互联电力系统动态等值方法及相关问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [18] 张宝珍, 张尧, 林凌霄. 基于改进差分进化算法的估计等值法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 7-13.
ZHANG Baozhen, ZHANG Yao, LIN Lingxue. Estimation equivalence method based on modified differential evolution algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(2): 7-13.
- [19] 陈厚合, 姜涛, 李国庆. 基于一种动态等值新方法的直流功率调制控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 192-200.
CHEN Houhe, JIANG Tao, LI Guoqing. HVDC modulations using new dynamic equivalence method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 192-200.
- [20] 张志刚, 马光文, 王黎. 基于启发式动态规划方法的发电商最优竞价策略[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 71-75.
ZHANG Zhigang, MA Guangwen, WANG Li. Optimal bidding strategy of generation companies based on heuristic dynamic programming[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 71-75.
- [21] 陈爱东, 龚乐年. 模糊动态规划法在变电站电压无功控制中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 29-32.
CHEN Aidong, GONG Lenian. Application of fuzzy dynamic programming to reactive power and voltage control in a distribution substation[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 29-32.
- [22] NI Z, HE H, WEN J, et al. Goal representation heuristic dynamic programming on maze navigation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2013, 24(12): 2038-2050.
- [23] NI Z, HE H, WEN J. Adaptive learning in tracking control based on the dual critic network design[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2013, 24(6): 913-928.
- [24] SU Y, LIU J, LIAO S, et al. Transient overvoltage control for wind farm based on goal representation adaptive dynamic programming[C] // IEEE International Conference on Power System Technology, 2014:705-712.
- [25] UI X, TANG Y, HE H, et al. Energy storage based low frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 9(2): 1-10.
- [26] TANG Y, HE H, WEN J. Comparative study between HDP and PSS on DFIG damping control[C] // IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid, 2013: 59-65.
- [27] BAI H, ZHANG P, AJJARAPU V. A novel parameter identification approach via hybrid learning for aggregate load modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1145-1154.
- [28] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 基于 Matlab/Simulink 的电力系统仿真工具箱的开发[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 95-101.
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Development of a Matlab/Simulink based power system simulation toolbox[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 95-101.

收稿日期: 2015-09-12; 修回日期: 2016-02-26

作者简介:

杜 治(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划和运行、能源经济和辅助决策;

苏 宇(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事自适应动态规划算法在电力系统稳定分析与控制中的应用研究;
E-mail: suyuhust@foxmail.com

姚 伟(1983-), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)