

基于连续体模型的电力系统频率动态研究

吕乾勇^{1,2}, 马晓红^{1,2}, 朱思国³, 毛先胤^{1,2}, 黄欢^{1,2}, 杨柳青^{1,2}, 田承越^{1,2}

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2. 南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

3. 输变电设备防灾减灾国家重点实验室, 湖南 长沙 410000)

摘要:针对电力系统连续体建模过程中发电机参数分配存在的复杂性较大的问题,提出了一种基于最短路径的连续体模型参数分配方法。该方法首先通过摇摆方程将传统离散系统连续化,并根据本文设计的算法计算得到存在扰动的发电机到剩余发电机的所有路径,选取扰动传播的最短路径,并将发电机惯性常数平均分配到各最短路径。每条最短路径上再采用高斯分配法将分配得到的参数进行再次分配,给出了参数分配过程中的准确表达式。通过对 New England 10 机 39 节点标准数据集进行算例仿真可知,从扰动源出发到各发电机的传播路径数量庞大,参数分配复杂度很大。通过选取各对应的 9 条最短路径进行参数分配,大大降低了参数分配的计算复杂度,同时使得对整个系统的分析和描述更加准确。

关键词:电力系统;连续体模型;发电机;参数分配;最短路径

文章编号:2096-4633(2019)08-0040-06 **中图分类号:**TM72 **文献标志码:**B

随着科学的进步和电能需求量的增加,电力系统的规模和复杂度日益增大,使得电力系统面临的系统稳定问题日益突出。IEEE/CIGER 稳定定义联合工作组根据电力系统失稳的物理特性、受扰动的大小以及研究稳定问题必须考虑的设备、过程和时间框架等方面,将电力系统稳定性分为功角稳定、电压稳定和频率稳定^[1]。

频率作为电力系统的重要参数,是衡量电能质量的主要指标之一。当电力系统遭受各种扰动(如短路、切除发电机、切除负荷等)后,由于系统有功功率平衡遭到破坏,必然会导致系统频率发生扰动从而发生频率动态过程。频率扰动会随着母线进行传播^[2-4],机电扰动在系统中的传播可能会影响到电力系统的安全稳定运行。研究机电扰动的传播对深刻认识电力系统的动态机理、进行动态稳定性分析以及建立安全稳定的控制系统有着重要的意义。

文献[5]借助 GPS 技术,研究了同步向量测量技术和观察到的功角响应,应用连续体系的概念和均匀传输线理论,把发电机的转动惯量均匀地分布于相应的输电电路上,引入增量元件的通用模型,得到机械和电磁耦合的非线性机电波方程。从而发现机电扰动的传播速度远小于光速,并给出了机电波的传播速度 $v = \sqrt{b/m}$,说明了机电波的传播速度与线路阻抗

的大小有关,线路阻抗越小,传播速度越快。文献[6]计算得出了在其假设下机电波的传播速度 $v = 500 \text{ km/s}$,并给出了求解连续体中扰动传播时间的计算公式,得到阻抗越小,传播时间越短的结论。

传统方法对电力系统进行分析时将其作为一个离散系统,对离散系统的各个部分进行单独建模,最后根据所建模型对进行整体分析。由于机电扰动在电力系统的连续体模型中机电扰动传播和离散系统中传播具有相似的特性,相关物理量具有具有一一对应的关系^[7]。因此,针对复杂的大型电力系统,要关注机电扰动在整个电力系统中的传播过程,使用连续体系统能从更大的空间尺度对机电扰动传播的动态机理进行描述,从而使描述更加准确^[8]。

离散系统在建模过程中把发电机参数作为集中参数加以处理,使用连续体模型建模时把发电机离散的集中参数进行连续化,从而得到连续体模型下系统的方程^[9]。使用连续体表示的模型在描述大的系统如全球电力系统时比传统的离散系统有着更多的优越性^[10]。

在连续体建模过程中,参数分配是一个很重要的问题。参数分配的合理性直接影响建模的准确性。文献^[11]给出了高斯函数法(Gaussian smooth method, GSM),并给出了参数分配的公式。由于频率扰动传播的路径并不唯一,通常多达数百条,此时如果仍旧使用

GSM方法进行系统参数分配,将会因传播路径数过多而增加参数分配的难度,从而加大系统建模难度。考虑到机电波沿不同路径传播时传播速度和时间的不同,在基于最短传播时间的思想上,本文提出了一种复杂性较低的最短路径参数分配方法。基于最短路径的分配方法,一方面会使参数分配和系统分析更加简单,另一方面,也为机电波扰动的抑制提供了思路。

1 频率动态方程连续化

1.1 传统离散电力系统

在对链式电力系统进行分析时需先作如下基本假定:

- (1) 发电机转速 ω 趋近同步转速 ω_s ;
- (2) 忽略发电机定子绕组的电磁暂态过程;
- (3) 发电机内阻抗极小,可以认为发电机内电势的相角和其机端母线电压的相角近似相等;
- (4) 所有母线的电压有效值均相等,且设其标幺值为 1.0;
- (5) 系统中每一条母线上都接有发电机和负荷,输入发电机的机械功率和母线上负荷的功率均保持恒定不变。
- (6) 输电线路的电阻远小于电抗。即 $R \ll X$;
- (7) 扰动引起母线的相角偏差 $\Delta\theta$ 的绝对值较小,即存在 $|\Delta\theta| \leq 1$,故 $\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta$ 和 $\cos\Delta\theta \approx 1$ 。

实际复杂的电力系统由简单的链式系统构成,一个由 N 台发电机组成的链式电力系统模型如图 1 所示。

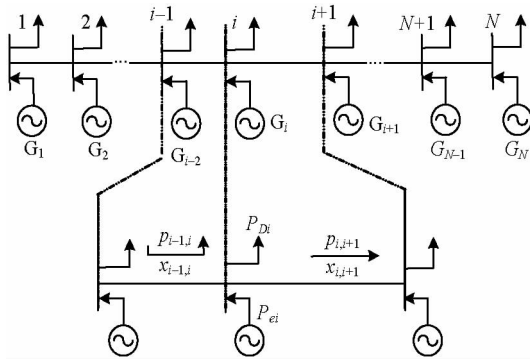


图 1 链式电力系统

Fig. 1 Chain type power system

传统分析认为各发电机之间存在一定的距离,即定义发电机为空间中的离散点。设第 i 台发电机的角动量为 M_i ,阻尼系数为 d_i ,加速功率为 $P_{\Sigma i}$,则可以得到在考虑发电机阻尼情况下,链式系统中第 i

台发电机转子的摇摆方程表达式为^[12]:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{\Sigma i} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

1.2 离散系统连续化

在实际电力系统中,发电机离散地分布于系统中不同的位置。传统研究电力系统机电动态的方法中一般将输电线路使用集中参数表示,未能包含空间信息,即仅已知线路的电气参数而线路长度未知。然而,连续体模型从机电波传播角度把发电机惯性在空间进行连续化处理,即将空间中离散分布的发电机、负荷等集中分布参数通过连续化处理。由于在连续化处理过程中尽可能地将传统模型中网架结构的拓扑关系进行体现,使得连续体模型更逼近真实的电力系统。

当链式系统单位长度上发电机数量大幅度增加时,相邻发电机之间的距离将趋近于零,原来在发电机处存在的离散参数将通过数学上连续的密度函数加以表示,使用密度函数形式表示的摇摆方程为:

$$m(x) \frac{d^2 \delta}{dx^2} + d(x) \frac{d \delta}{dx} = p_m(x) - p_e(x) \quad (2)$$

若忽略机电波传播过程中的衰减因素,以及坐标 x 处注入网络的功率,即令 $d=0, g=0, p_m=0$,则公式(2)可变为经典波动方程^[13]:

$$m(x) \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2} = b(x) \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

相对角速度 ω 、功率 p 与电压相角 θ 的关系为:

$$\begin{cases} \omega(x, t) = \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} \\ p(x, t) \approx -b(x) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(3),得到近似描述机电波传播的基本方程为^[14]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \omega(x, t) \approx \frac{1}{b(x)} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial}{\partial x} p(x, t) = m(x) \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

由公式(2) - (5)可知,连续体系统将原来传统的离散系统中离散的空间位置实现连续化,从而将空间位置也作为系统的一个变量。这就实现了从传统离散系统到连续体系统的转化。

连续体模型是离散模型的近似描述方法,为大规模研究电力系统的动态特性提供了一种新的手段。连续体模型不同于传统的机电动态分析方法,其主要面向复杂的大型电力系统,关注机电扰动在

整个电力系统中的传播过程,可以从更大的空间尺度研究机电扰动传播的动态机理。

2 频率传播路径与传播时间

2.1 频率扰动传播时间

当扰动发生后,机电波以有限的速度进行传

$$\Delta P = \begin{cases} 10[\varepsilon(t) - \varepsilon(t - 0.01)] & 0 \leq t < 0.01 \\ -10[\varepsilon(t - 0.01) - \varepsilon(t - 0.02)] & t \geq 0.01 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数。

设置扰动发生点在第 30 号母线,通过仿真可以得到各发电机母线(30-39)上的频率增量的变化曲线如图 2 所示。

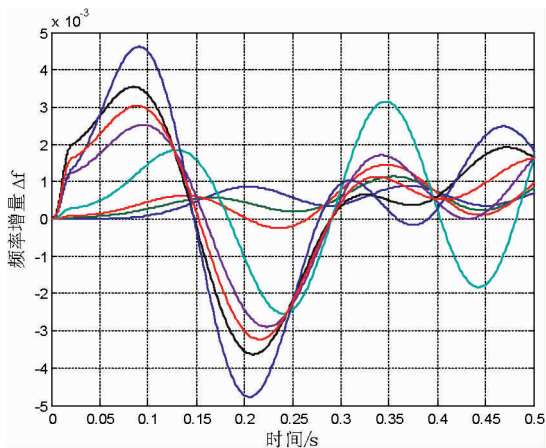


图 2 频率增量的变化曲线

Fig. 2 Change curve of frequency acceleration

由图 2 可知,当扰动发生后,扰动传播到各母线的的时间是不同的,当扰动发生在第 30 号母线时,到达各母线的的时间如表 1 所示。

表 1 频率扰动到各母线传播时间

Tab. 1 Spreading time of frequency destabilization to buses

| | | | | | |
|--------|----|-------|------|------|------|
| 扰动到达点 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 |
| 传播时间/s | 0 | 0.225 | 0.21 | 0.16 | 0.11 |
| 扰动到达点 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| 传播时间/s | 0 | 0.095 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |

由表 1 可知,当扰动发生后,到达各发电机母线的的时间是不相同的,说明了扰动在各路径上传播的时间差异性。

2.2 最短路径法

在连续体建模过程中,参数分配是一个很重要的问题,直接影响建模的准确性。文献[8]利用 GSM 方法进行参数分配,但该方法必须考虑频率传播的所有路径,及将参数分配到所有的路径上。当

播,到达系统中各点的时间是不相同的。考虑到实际电力系统的扰动,本文以负荷的变化模拟系统初始扰动,通过负荷先增量再减小最后恢复到原有负荷水平的一个动态过程表示。以一个 New England 10 机 39 系统为例,设置初始扰动的数学表达式为^[15]:

系统中发电机组数量较多时,系统中计算参数分配的计算复杂度会大大增加,故本文提出了一种通过最短路径进行参数分配的方法。

在寻找最短路径的过程中,常见的搜索算法有广度优先和深度优先两种方式。由于广度优先搜索算法需要维护一个先进先出的队列保存搜索树状态,导致算法具有较高的空间复杂度。深度优先搜索算法对已搜索过节点的多有后代节点都可以不再保存,使需要保存的搜索树状态大大减少,因此本文采用深度优先搜索算法。

本文在算法设计中用到了图论思想、递归思想以及深度优先搜索的搜索算法。其中图论思想主要用在由参数表格构建系统的邻接矩阵以及和邻接矩阵对应的含有阻抗信息的另外一个矩阵,他们的作用是作为程序的输入,为搜索提供判断的依据。递归思想是用于路径的搜索,当每次得到一个值,先判断是否满足终止的条件,若不满足则把所得结果当成输入继续进行搜索,即调用函数自身。深度优先搜索是首先沿着某路径进行搜索,当搜索到底得到一条路径后,进行回溯,继续搜索其他路径,以此类推,直到找到所有的路径。得到所有的路径和对应的阻抗值后,通过两次排序就可以得到扰动源到各发电机母线的的最短路径。

因为线路参数的不同导致了在不同线路上扰动传播时间的不同,则可以只考虑传播时间较短的线路,将发电机的参数分配给与其连接的发电机母线的最短线路上。假设系统中有 N 台发电机,待分配的发电机的惯性常数为 M ,将 M 平均分配到各最短路径,其表达式为:

$$M_i = \frac{M}{N - 1} \quad (7)$$

对分配得到的惯性常数,每条最短路径再使用高度连续和光滑的 Gauss 函数对分配所得的参数进行分配,分配的表达式为:

$$m_i(x_i) = M_0 e^{-c_i x_i^2} \quad (8)$$

其中 x_i 表示第 i 条线路上的一个空间点, M_0 为 Gauss 函数在其中心点处(母线位置)的最大值。根据连续体处理前后的惯性与原母线上集中分布的惯性相等,可得:

$$M_i = \int_{l_i} m_i(x_i) dx_i = M_0 \int_{l_i} e^{-c_i x_i^2} dx_i \quad (9)$$

发电机惯性常数分配是连续体建模中的重要研究内容,由公式(7) - (9)可知,在进行参数分配中通过只考虑从扰动源到各发电机母线的最短传播路径,而不是基于 GSM 方法的所有路径,大大降低了参数分配的计算复杂度。

3 算例仿真

为验证本文方法的正确性,本文采用一个 New England 10 机 39 节点标准数据集进行研究,提取其起始母线与终止母线以及对应的阻抗信息,按以下三个条件采用深度优先法进行搜索:

- (1) 从发电机母线出发,以发电机母线结束;
 - (2) 路径不能重复;
 - (3) 每搜索得到一条路径,记录对应的阻抗值。
- 得到本文程序设计的示意图如图 3 所示。

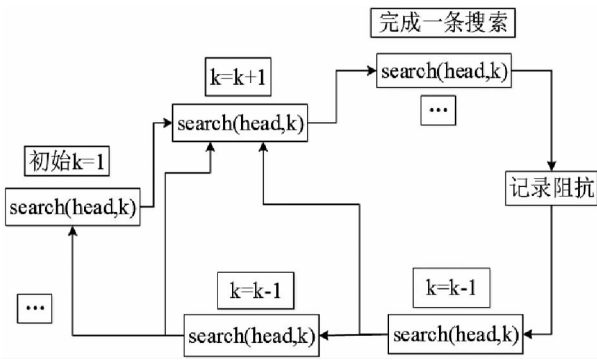


图 3 本文程序设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the article program design

由图 3 可知,程序将递归和深度优先搜索相结合,其中 head 为函数的输入,初始值默认为 40, k 为搜索的层数,即对已经搜到的母线数进行统计,初始值 $k = 1$ 。每进行一次搜索,将所得结果作为下一次的输入,并把 k 值加 1,直到完成一条路径的搜索。每完成一条路径的搜索,同时记录对应的阻抗值,然后进行回溯,继续搜索其他的路径。当 k 值再次等于 1 时,便完成了从某出发点的所有路径的搜索。本次得到从 40 - 49 出发的,以 40 - 49 结尾(不包含

自身)的所有路径以及其对应的阻抗值,通过排序得到其中各自的最短路径,并通过统计和排序得到了各自通过的母线的次数排行。此项工作的意义在于寻找从不同扰动源出发后经过哪些母线的次数最多,则当该母线处发生扰动,如果能及时在对应的重要母线上加以抑制,则能起到很好的效果,降低扰动对系统的影响。

使用本文设计算法进行路径搜索,得到分别从 30 - 39 号母线出发的路径总数如表 2 所示。

表 2 各起始母线对应的路径数

Tab. 2 Route number of per original wire

| 起始母线 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 路径数 | 284 | 304 | 502 | 215 | 215 |
| 起始母线 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| 路径数 | 426 | 426 | 344 | 650 | 362 |

由表 2 可知,从各扰动源出发的路径数均为数百条,路径数最多的 38 号母线对应的路径数量为 650 条,所有母线对应的路径总数为 3 728 条。如果按照传统方法进行传统分配,则需要将发电机惯性常量分配到数千条路径中,造成参数分配的计算复杂度大大增加,不利于后期的系统分析。

由于所用系统共有 10 条发电机母线,即 $N = 10$,可知从扰动源出发到剩余发电机母线共有 9 条最短路径,设扰动源处发电机惯性常数为 M ,根据式(3)可得惯性分配的结果为:

$$M_i = \frac{M}{9} \quad (10)$$

由公式(10)可知,相比传统将发电机惯性常数分配到数千条的路径的方法,将发电机惯性常数 M 平均地分配到 9 条最短路径的参数分配方法一方面大大降低了参数分配的复杂性,同时也为后期电力系统的进一步分析奠定了基础。

4 结论

针对连续体建模过程中的参数分配问题,根据机电波沿不同路径传播速度和时间的不同,提出了一种基于最短路径的参数分配法,给出了参数分配的准确表达式。该方法通过寻找从发电机母线出发的到剩余发电机母线的最短传播路径,并将发电机惯性常量平均分配到最短路径上。通过对 New England 10 机 39 节点标准数据集进行实验,结果表明,从发电机母线出发的路径总数多达数千条,线路

条数远大于最短路径^[16]。因此,本文所提出的基于最短路径的参数分配方法在计算复杂度上远低于传统的 GSM。此外,基于最短路径的参数分配方法还为后期进一步的系统分析和扰动抑制提供了研究,说明了所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] CHO K, PARK J, CHOI J. Probabilistic reliability based grid expansion planning of power system including wind turbine generators [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2012, 7(05): 698 - 704.
- [2] 罗丹, 温和, 唐璐. 电网动态频率测量的移频迭代滤波方法及应用研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05): 151 - 156.
LUO Dan, WEN He, TANG Lu. Research on frequency-shifting iterative method for dynamic frequency measurement of power system and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(05), 151 - 156.
- [3] 李世宝, 贺昌, 刘建航, 等. 基于动态反馈与功率分配的干扰对齐方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(03): 728 - 733.
LI Shibao, HE Chang, LIU Jianhang, et al. Novel interference alignment scheme based on dynamic feedback and power allocation [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018, 40(03): 728 - 733.
- [4] 胡益, 王晓茹, 艾鹏, 等. 基于广域量测的交直流混联系统发生扰动后稳态频率预测算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 35 - 42.
HU Yi, WANG Xiaoru, AI Peng, et al. Prediction algorithm of steady-state frequency after disturbance for hybrid AC/DC power system based on wide area measurement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 35 - 42.
- [5] 刘灏, 李珏, 毕天姝, 等. 一种自适应同步相量测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5063 - 5071.
LIU Hao, LI Jue, BI Tianshu, et al. An adaptive synchrophasor measurement method. [J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(17): 5063 - 5071.
- [6] HONG Y Y, WEI S F. Multiobjective under frequency load shedding in an autonomous system using hierarchical genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1355 - 1362.
- [7] 魏星, 王晓茹, 王德林, 等. 计及发电机内电抗的链式电力系统机电扰动传播研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1624 - 1630.
WEI Xing, WANG Xiaoru, WANG Delin, et al. Research of electromechanical disturbance propagation in a chain power system considering generator internal reactance [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(10): 1624 - 1630.
- [8] RAO X, RUAN L, LAU V K N. Limited feedback design for interference alignment on MIMO interference networks with

- heterogeneous path loss and spatial correlations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(10): 2598 - 2607.
- [9] 朱丽平. 系统功率振荡事件分析[J]. 电力大数据, 2018, 21(05): 86 - 91.
ZHU Liping. Analysis of system power oscillation for an event [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(05): 86 - 91.
- [10] PETERS S W and HEATH R W. Cooperative algorithms for MIMO interference channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(01): 206 - 218.
- [11] ESMAEILIAN A, KEZUNOVIC M. Fault location using sparse synchrophasor measurement of electromechanical-wave oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(04): 1787 - 1796.
- [12] LI T Y, LEDWICH G, MISHRA Y, et al. Wave aspect of power system transient stability-Part II: Control implications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(04): 2501 - 2508.
- [13] 燕跃豪, 鲍薇, 李晓方, 等. 基于波动传递函数的电网扰动传播频率特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 111 - 117.
YAN Yuehao, BAO Wei, LI Xiaofang, et al. The frequency characteristic analysis of disturbance propagation in power networks based on wave transfer function [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 111 - 117.
- [14] 夏成军, 华夏, 谢家正. 电力系统机电扰动传播研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(04): 1361 - 1370.
XIA Chengjun, HUA Xia, XIE Jiazheng. A review of propagation of electromechanical disturbance in power systems [J]. Power System Technology, 2019, 43(04): 1361 - 1370.
- [15] 毕天姝, 燕跃豪, 杨奇逊. 基于电网框架结构模型的机电波到达时间预测算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 207 - 213.
BI Tianshu, YAN Yuehao, YANG Qixun. The Prediction algorithm for the arrival time of electromechanical waves based on structural frame model of power networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 207 - 213.
- [16] 齐文斌. 采样频率的配网接地故障检测与定位[J]. 电力大数据 2018, 20(05): 59 - 65.
QI Wenbin. Ground fault detect and location of distribution network for multi sampling frequency [J]. Power Systems and Big Data. 2018, 20(05): 59 - 65.

收稿日期: 2019 - 06 - 05

作者简介:



吕乾勇(1992), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压技术研究。

(本文责任编辑: 范斌)

Study on frequency dynamic of power system based on continuum model

LV Qianyong^{1,2}, MA Xiaohong^{1,2}, ZHU Siguo³, MAO Xianyin^{1,2}, DU Hao³,
HUANG Huan^{1,2}, YANG Liuqing^{1,2}, TIAN Chengyue^{1,2}

(1. Power System Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang, 550002 Guizhou, China;

2. Key Laboratory of Ice Prevention & Disaster Reducing of China Southern Power Grid Co. Ltd., Guiyang, 550002 Guizhou, China;

3. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reducing for Power Grid Transmission and Distribution Equipment,
Changsha, 550002 Hunan, China)

Abstract: Aiming at the complexity in the parameter distribution in continuum modeling of the power system, a new approach of distributing parameters of generator based on shortest route was proposed. The traditional discrete system was continualized by the swing equation at first, and the routes from generator in disturbance to other generators were computed through the proposed method in the paper. and the shortest path of disturbance propagation is selected, Then the inertia constants of the generator are evenly distributed to the shortest paths, and the distributed parameter of every shortest route was redistributed by using Gaussian smooth method. The accurate formula of parameter allocation process was given. And the standard data set of 10 generators and 39 nodes system of New England was computed through the proposed method, the results indicated that the number of propagation routes from the disturbing source to other generators is huge, which increased the difficulty of parameter distribution. The 9 shortest routes were chosen to distribute the parameter, which greatly reduced the difficulty of parameter distribution and made the analysis of power system more accurate.

Key words: power system; continuum model; generator, parameter distribution, shortest route