

计及统一潮流控制器的电网随机潮流计算方法

张宁宇, 周前, 胡昊明, 陈静

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:提出一种考虑统一潮流控制器(UPFC)的随机潮流计算方法,采用UPFC的等效注入功率模型,根据接入位置建立含UPFC的稳态潮流计算模型,并采用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算并确定电网的稳态运行点,在稳态运行点对电网潮流方程进行线性化计算,得到雅克比矩阵;对电网中各种随机因素建立随机概率密度函数,计算得到各随机变量的各阶半不变量后,利用半不变量法在雅克比矩阵的基础上计算得到电网节点电压、线路功率的对应半不变量,最终得到节点电压和线路功率的概率密度函数,最后通过IEEE-14节点进行了验证。

关键词:UPFC;随机潮流计算;雅克比矩阵;半不变量

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)06-0032-04

随着电力系统区域间互联加强、输电电压等级的提高、非线性负荷和高精度用电设备对高电能质量的需求,我国电网亟待解决许多挑战性问题,如远距离输电、不同性质负荷的优化调度等;但由于土地资源日益稀缺,线路走廊和变电站建设收到限制,电网之间互联复杂程度增加,传统调度技术不再适用。上述这些问题,传统的电力技术已经难以发挥作用,随着大功率的柔性交流输电技术的日趋完善,为解决这些问题提供了新的思路。统一潮流控制器(UPFC)作为潮流调节能力最强的一种混合型FACTS装置,仅通过控制规律的改变就能分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等几种不同的功能,达到对线路有功和无功功率及节点电压实时调节的目的。在实际电力系统运行中,负荷预测存在误差,运行条件也在不断变化,如负荷功率的变化、发电机出力的变化等。近年来可再生能源发电的接入更加剧了电力系统的不确定性,随机潮流计算可以计及这些不确定因素。在考虑各种随机因素的前提下,计算出节点电压和支路功率的统计信息(期望值、方差及分布函数等),能全面地反映系统的整体情况^[1-3]。从而可从整个电网在各种运行条件下的性能有一个全面、综合的评价,比一般潮流更能揭示电力系统运行的特性,便于发现系统运行的潜在危机和薄弱环节,为电力系统的规划、可靠性分析以及系统安全性分析等提供更有参考价值的信息。随机潮流计算中,随机变量的卷积运算是其中计算量较大的部分,除常规的递归卷积算法以外,计算随机变量的分布采用最多的是以半不变量为基础的Gram-Charlier级数展开方法。

文献[4-6]基于灵敏度推导,将支路故障等效处理为注入功率扰动,但同时也指出由于某些支路故障对系统影响较大,等效注入功率远大于节点负荷的扰

动,灵敏度矩阵计算产生的误差不容忽略,需另行考虑更为准确的计算方法。文献[4]提出一种考虑传输网络故障的随机潮流算法,但由于没有考虑电网实时运行状态,仅采用传统的长期网络元件停运模型,一般仅用于规划分析。文献[5]基于Monte Carlo抽样法实现了含UPFC的概率潮流计算,并根据线路和节点电压的概率分布情况确定UPFC的最优安装位置, Monte Carlo计算本身需要消耗大量的计算,不适合大规模电网的优化计算。文献[6]通过若干次最优潮流计算得到UPFC可能的安装位置和补偿容量,并提出节点LMP指标用于最终确定UPFC的安装位置。

综上所述,现考虑UPFC的随机潮流计算均采用Monte Carlo模拟实现,或计算复杂,或消耗大量时间,无法快速准确地反映UPFC接入电网的运行安全状况。本文提出一种考虑UPFC的随机潮流计算方法,采用UPFC的等效注入功率模型,在稳态运行点对电网潮流方程进行线性化计算,得到雅克比矩阵;对电网中各种随机因素建立随机概率密度函数,计算得到各随机变量的各阶半不变量后,利用半不变量法在雅克比矩阵的基础上计算得到电网节点电压、线路功率的对应半不变量,最终得到节点电压和线路功率的概率密度函数。

1 UPFC 稳态模型

目前为止,由于UPFC等效注入功率模型和解耦模型具有原理简单,易于实现,已广泛应用于电力系统稳态分析。然而,上述UPFC模型除需要新增网络节点数量,导致计算量增加外,不能直接建立UPFC控制变量与运行费用之间的数学关系,影响到概率灵敏度指标的计算。为克服现有UPFC等效模型的不足,本文采用一种基于理想变压器和对地可调电容的UPFC稳态模型用于随机最优潮流模型的建立,其中UPFC变量

包含变压器幅值、相角和可调电容 3 个变量,并可上述控制变量作为所在线路参数的控制变量,在保证原有节点数量不变的情况下,易于实现含 UPFC 随机潮流的计算^[7]。

忽略变压器等效阻抗后的 UPFC 简化等效模型如图 1 所示。其中节点 m 和 n 为 UPFC 的输入、输出节点, U_m, θ_m 为节点 m 电压的幅值和相角; U_n, θ_n 为节点 n 电压的幅值和相角; I_m, δ_m 为节点 m 流向节点 n 电流的幅值和相角; S_m 为注入节点 m 的复功率; S_n 为从节点 n 流出的复功率; \dot{U}_{sc} 为 UPFC 串联侧等效电压; i_{sh} 为 UPFC 并联侧等效电流。

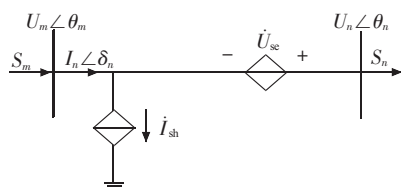


图 1 简化的 UPFC 等效电源模型

对于系统而言,UPFC 主要发挥了输送有功功率并消耗或注入无功功率的作用,因此可将 UPFC 等效为一个理想变压器和对地可调电容结构,如图 2 所示。

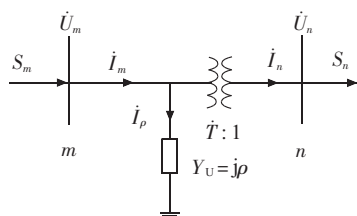


图 2 UPFC 的理想变压器模型节点

图 2 中, T 为变压器的变比; Φ 为变压器的移相角度; ρ 为对地可调电容的容量。由于等效 UPFC 变量 T 、 Φ 和 ρ 相互独立,且与 UPFC 节点的输入、输出无关,可作为所在线路的导纳矩阵进行雅克比矩阵的计算。由图 2 可得到节点 m 和 n 的电压、电流关系式:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_n \dot{T} \quad (1)$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}_n / \dot{T}^* + j\rho \dot{U}_n \dot{T} \quad (2)$$

经推导后,得到二端口网络等式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_m \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = Y_U \begin{bmatrix} \dot{U}_n \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: Y_U 为二端口网络的等效参数。

$$Y_U = \begin{bmatrix} \dot{T} & 0 \\ j\rho \dot{T} & 1/\dot{T}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)与 UPFC 所在线路的二端口等效电路进行计算,便可得到含 UPFC 变量的线路参数,在没有增加节点数量的情况下,可直接建立含 UPFC 控制变量的随机潮流模型。

2 基于半不变量法的随机潮流计算

2.1 随机潮流模型

随机潮流考虑的随机因素包括负荷的不确定性与发电机的强迫停运率。在随机潮流的模型中将交流潮流方程线性化,并假设各节点注入功率的随机变化是独立的,则系统状态变量实际上是各独立注入功率随机变量的线性组合,权重系数为灵敏度系数。基于以上假设,可采用卷积计算和级数展开等方法获得状态变量的随机分布^[8]。考虑节点注入功率的随机变化,将交流潮流方程在基准运行点处线性化,可得:

$$\begin{cases} X = X_0 + \Delta X = X_0 + S_0 \Delta W \\ Z = Z_0 + \Delta Z = Z_0 + T_0 \Delta W \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: X, Z 分别为节点电压和支路功率,下标 0 为基准运行状态; ΔW 为注入功率的随机变化量; S_0, T_0 分别为节点电压和支路功率对注入功率变化的灵敏度。

若各节点注入功率的随机变化相互独立,则求它们的线性和实际上是做卷积运算,即:

$$\Delta W = \Delta W_g * \Delta W_l \quad (6)$$

式(6)中: ΔW_g 和 ΔW_l 分别为发电机组出力和负荷功率的随机变量。

由于卷积的计算量很大,采用以半不变量为基础的 Gram-Charlier 级数展开方法计算随机变量的分布以减小计算量。

2.2 半不变量法随机潮流计算

基于半不变量法的随机潮流计算步骤如下^[9,10]:

- (1) 读入电网数据。
- (2) 用牛顿拉夫逊法计算基准潮流。
- (3) 计算发电机及负荷(离散型或连续型)注入功率的各阶中心距。
- (4) 由各阶中心距计算出发电机及负荷(离散型或连续型)注入功率各阶半不变量。
- (5) 根据半不变量的性质,有:

$$\Delta W^{(k)} = \Delta W_g^{(k)} * \Delta W_l^{(k)} \quad (7)$$

式(7)中: $\Delta W_g^{(k)}$ 与 $\Delta W_l^{(k)}$ 分别为发电机注入功率与负荷注入功率的各阶半不变量。

(6) 由式(5)可知,节点电压和支路功率的各阶半不变量为:

$$\begin{cases} \Delta X^{(k)} = S_0^{(k)} \Delta W^{(k)} \\ \Delta Z^{(k)} = T_0^{(k)} \Delta W^{(k)} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $S_0^{(k)}$ 和 $T_0^{(k)}$ 分别为矩阵 S_0 和 T_0 中元素的 k 次幂所形成的矩阵。

(7) 应用 Gram-Charlier 展开级数,求出状态变量和支路功率的随机分布。

3 算法流程

根据已建立的 UPFC 稳态模型,将概率理论与半不变量法随机潮流相结合,构成一种计及 UPFC 的电网随机潮流计算方法。具体流程如图 3 所示。

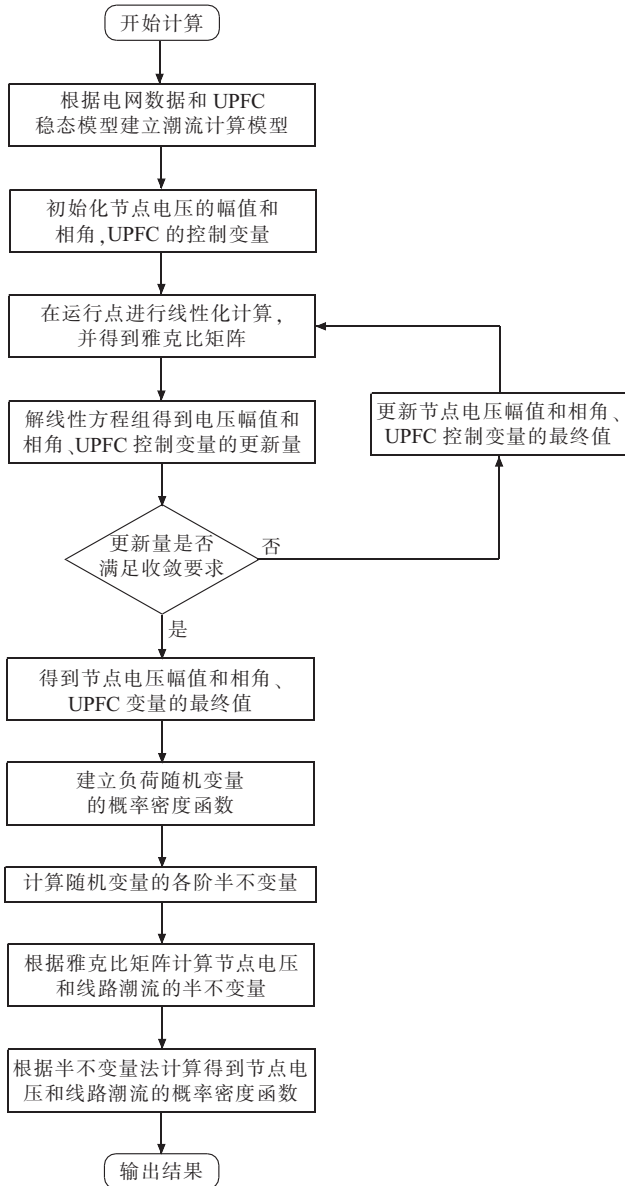


图 3 计及 UPFC 的电网随机潮流算法流程

4 算例分析

为对本文提出考虑 UPFC 的电网随机潮流计算方法的正确性和可行性进行验证,本节以 IEEE-14 节点系统为例进行仿真计算。硬件平台信息如下:CPU 为酷睿双核,主频为 2.8 GHz,内存为 2 GB,程序开发环境为 Matlab2010 b。

IEEE-14 节点系统包括 2 台发电机,具体参数如表 1 所示。15 条线路,网架接头如图 4 所示。线路参数和节点负荷数据可见文献[11]。部分节点负荷的预测均值和标准差如表 2 所示。

表 1 发电机参数

发电机	P_{\max}/MW	P_{\min}/MW	Q_{\max}/Mvar	Q_{\min}/Mvar
1	250	45	150	-100
2	150	15	50	-40

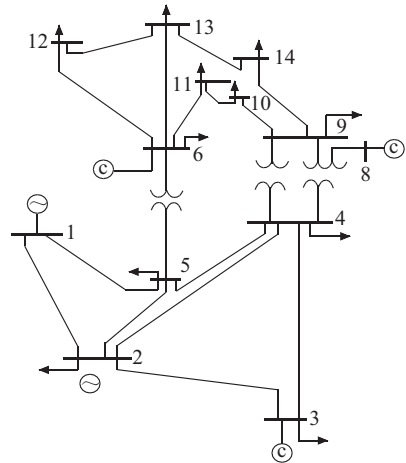


图 4 IEEE-14 节点的网架结构图

表 2 节点负荷数据

节点	有功 / MW	无功 / Mvar	有功负荷标准差	无功负荷标准差
1	0	0	—	—
2	21.7	12.7	2.31	1.12
3	94.2	19	43.4	2.32
4	47.8	3.9	11.22	1.01
5	7.6	1.6	1.44	0.67

基于文献[11]的分析结果,节点 2 与节点 5 之间的线路为 UPFC 的最佳安装,因此在 UPFC 安装于节点 2 与节点 5 的线路上时,采用本文所述的含 UPFC 随机潮流方法进行计算。当 UPFC 的控制参数 T, Φ, ρ 分别取 0.98, 0.004, 0.3, 节点 4 和节点 5 的电压概率密度曲线如图 5 所示。

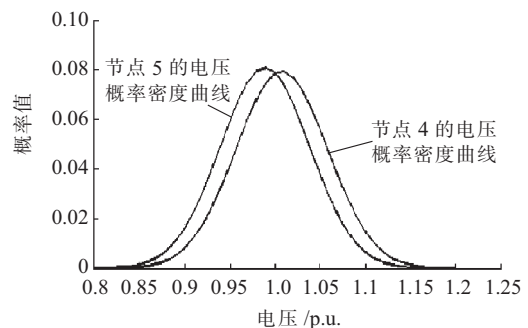


图 5 节点 4 和节点 5 的电压概率密度曲线

由图 5 可见,受到负荷随机性的影响,系统节点电压不再是某一固定值,而是变为服从概率分布的随机变量,具体的分布特性决定于节点的位置以及与负荷随机变量的特性。根据图 5 得到的节点概率密度曲线,可对负荷随机性对于电网节点电压影响进行分析,结果可用于指导电网规划与运行。

节点 1 和节点 2 之间、节点 1 和节点 5 之间线路的有功功率概率密度曲线分别如图 6 和图 7 所示。由图可知,受节点负荷随机性的影响,上述 2 条线路也服从相应概率密度分析,有助于分析线路的过载情况。

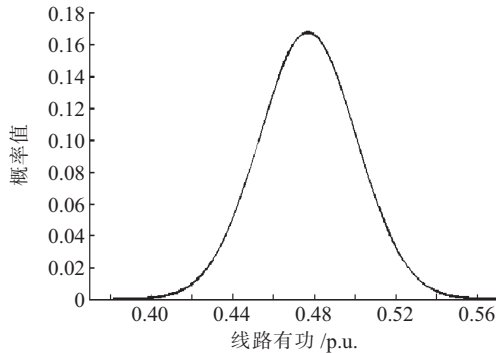


图 6 节点 1 和节点 2 之间线路的有功概率密度

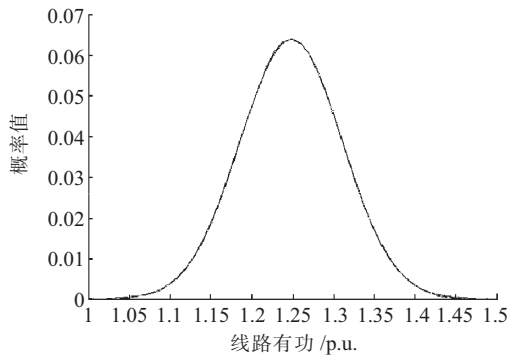


图 7 节点 1 和节点 5 之间线路的有功概率密度

5 结束语

本文提出一种计及 UPFC 的随机潮流计算方法,为便于利用已有潮流计算算法,采用 UPFC 的等效注入功率模型,并将传统串联侧、并联侧等效电源控制变量转换为理想变压器和对地可调电容变量,避免了雅克比矩阵的修正,减小了计算复杂度。在此基础上,基于半不变量法实现了含 UPFC 电网的随机潮流计算,并通过算例仿真验证了所述算法的正确性和有效性。

参考文献:

[1] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.

- [2] 张节潭,程浩忠,姚良忠,等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):1-7.
- [3] 丁明,李生虎,黄凯,等. 基于蒙特卡洛模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术,2001,25(11):10-14.
- [4] MIAO L, ZHAO Y D, SAHA T K. A Probabilistic Load Flow Method Considering Transmission Network Contingency [C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007:1-6.
- [5] TIWARI P K, SOOD Y R. Efficient and Optimal Approach for Location and Parameter Setting of Multiple Unified Power Flow Controllers for a Deregulated Power Sector [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 06(10):958-967.
- [6] IPPOLITO L. A Novel Strategy for Selection of the Optimal Number and Location of UPFC Devices in Deregulated Electric Power Systems [C]. IEEE Russia Power Tech, PowerTech, 2005:1-9.
- [7] SHAHEEN H I, RASHED G I, CHENG S J. Application and Comparison of Computational Intelligence Techniques for Optimal Location and Parameter Setting of UPFC [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(2):203-216.
- [8] 吴奕,万真理,张玉林,等. 配电网潮流计算方法在工程应用中的分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(4):10-13.
- [9] 胡泽春,王锡凡,张显,等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):26-33.
- [10] 胡泽春,王锡凡. 基于半不变量法的随机潮流误差分析[J]. 电网技术,2009,33(18):32-37.
- [11] SEUNGWON A, JOHN C, THOMAS W G. An Ideal Transformer UPFC Model, OPF First-Order Sensitivities, and Application to Screening for Optimal UPFC Locations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):68-75.

作者简介:

张宁宇(1985),男,山西五台人,工程师,研究方向为电力系统优化与运行、柔性交直流输电;

周前(1979),男,江苏宜兴人,高级工程师,研究方向为无功优化、柔性交直流输电;

胡昊明(1986),男,江苏南京人,工程师,研究方向为电力系统稳定分析;

陈静(1988),女,江苏南通人,工程师,研究方向为柔性交直流输电。

A Probabilistic Load Flow Algorithm Considering UPFC

ZHANG Ningyu, ZHOU Qian, HU Haoming, CHEN Jing

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper proposes a stochastic load flow algorithm considering unified power flow controller (UPFC), which is based on the equivalent power injection model. The steady state power flow considering is obtained by the Newton-Raphson method. The Jacobian matrix is acquired by linearizing the formulas of power grid. After calculating the semi-invariant of each random variable, probability density of bus voltage and line power is computed comfortably. In the end, the simulation results on the IEEE-14 test system validate the proposed method.

Key words: unified power flow controller (UPFC); probabilistic load flow; jacobian matrix; semi-invariant