

基于序列运算的含分布式发电配电网潮流分析

苏胜皓¹, 宋锐¹, 陈庆芳¹, 张庆祝¹, 曾成碧², 刘晓豪²

(1. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 西昌 615000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对分布式电源接入配电网及负荷变化产生的随机潮流造成可能出现的功率越限问题, 提出一种基于序列运算的线路双向潮流分析方法。通过序列化方法描述包含分布式电源的配电网系统随机变化情况; 在此基础上结合线路状态转移模型, 对不确定性出力导致支路正反两向剩余可用裕度概率分布的变化进行综合风险评判。通过 IEEE-34 节点算例表明, 上述方法能准确识别出配电网中敏感和危险线路, 并有效地对含分布式发电的配电网提供安全运行的优化决策。

关键词: 分布式发电; 配电网; 序列运算; 线路潮流; 安全性

Power flow analysis of distribution network containing distributed generation based on sequence operation

SU Sheng-hao¹, SONG Rui¹, CHEN Qing-fang¹, ZHANG Qing-zhu¹, ZENG Cheng-bi², LIU Xiao-hao²

(1. Liangshan Power Supply Corporation, State Grid Sichuan Electric Power Company, Xichang 615000, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In view of problem that the stochastic flow produced by the distributed power accessing to distribution network and load change can cause the possible problem of overload, this paper proposes a bidirectional power flow analysis method based on sequence operations. Firstly, the serialization method is used to describe the random variation of distribution network system that contains the distributed power. Based on that, combined with the circuit state transition model, a comprehensive risk evaluation of remaining available margin probability distribution changes of the positive and negative of the branch due to uncertainty output is made. Example analysis of IEEE-34 node system proves that the method can identify the sensitive and dangerous lines in distribution network accurately, and provide optimized decisions for safe operation of distribution network containing distributed generation effectively.

Key words: distributed generation; distribution network; sequence operation; power flow; safety

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0012-06

0 引言

以风能、太阳能等形式的分布式电源 (Distributed Generation, DG) 缓解了日益紧张的能源危机和环境问题, 受到相关部门和研究人员的关注^[1]。由于 DG 自身出力存在间歇性与波动性, 接入配电网后, 对系统的潮流分布和安全运行产生影响, 如何准确、有效地分析潮流变化及功率预测成为重要的技术关键之一。

目前, 随着 DG 接入电网的比重逐渐增加, 电力系统面临更大的运行不确定性, 并且使线路潮流

方向与饱和度变化频繁。文献[2-3]利用序列运算理论提高了随机潮流的计算速度, 并通过改进直流潮流计算方法分析不确定因素对线路潮流的影响; 文献[4-5]对含 DG 配电网的潮流计算作了较为实用的方法改进; 文献[6]从安全性角度对含 DG 配电网进行详细分析; 文献[7]基于状态转移方法建立线路严重程度模型和线路转移因子对支路出现的潮流越限进行识别, 但不涉及负荷变化; 文献[8]分析了节点注入功率模式对电压裕度概率分布的影响, 但没有考虑线路中剩余可用裕度。

本文在以上研究基础上, 对含 DG (以风电为代表) 的配电网进行简化序列建模, 通过序列运算得出线路作为双向元件的可用率; 并引入状态转移因子参数标识各支路潮流的矢量变化, 对可能产生

基金项目: 四川省科技支撑项目 (2014GZ0069); 四川省教育厅自然科学基金项目 (13ZA0096)

的潮流越限问题综合判别, 发现系统中的危险和敏感支路, 采用 IEEE-34 节点系统仿真算例对该方法进行了验证。

1 系统简化序列建模

1.1 含风电机组的供应侧序列建模

1.1.1 常规机组出力序列化模型

常规机组 m 在运行过程中, 可出现由于故障等原因突然退出, 若将此类视之为二态机组, 设强迫停运率为 q , 令 $p=1-q$, 则典型的初始可用容量的概率性序列分布为

$$PR_m^{(0)}(i) = \begin{cases} p, & i = S_m \\ 0, & 0 < i < S_m \\ q, & i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, S_m 为机组出力的序列长度。设机组的额定容量为 C_{Nm} , 离散化步长为 ΔC , 得

$$S_m = \langle C_{Nm} / \Delta C \rangle \quad (2)$$

1.1.2 风电机组出力序列化模型

受风速等因素影响, 风电的出力 P_w 波动性大, 随机性强。通常会有预测系统给出未来风电出力的预测值, 但预测误差在 10%~30% 左右, 采用正态分布第风电机组出力的预测误差估计是较为有效的方法^[9]。在有风电功率预测的情况下, 风电出力的概率分布可视为服从参数为预测值 P_{wf} 与方差 σ^2 的正态分布, 即 $P_w \sim N(P_{wf}, \sigma^2)$ 。则风电机组的出力符合正态分布的随机变量, 并对此进行序列性建模^[10]。设风电出力的概率性序列为 $P_w(i)$, 则

$$P_w(i) = \begin{cases} \phi\left(\frac{\Delta C/2 - P_{wf}}{\sigma}\right), & i = 0 \\ \phi\left(\frac{i\Delta C + \Delta C/2 - P_{wf}}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{i\Delta C - \Delta C/2 - P_{wf}}{\sigma}\right), & 0 < i < S_w \\ 1 - \phi\left(\frac{i\Delta C - \Delta C/2 - P_{wf}}{\sigma}\right), & i = S_w \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4)$$

另外, ΔC 为离散化步长, S_w 为机组出力的序列长度。设风电机组额定容量为 C_{Nw} , 得

$$S_w = \langle C_{Nw} / \Delta C \rangle \quad (5)$$

1.2 需求侧序列建模

需求侧主要为不同类别的用电负荷。当多节点系统的负荷大部分以独立负荷时, 它们的投入和退出运行会分别对节点的总负荷值产生很大的影响。为简化起见, 将需求侧视为不区分负荷类型, 但考虑其预测的不确定性, 一般认为负荷变化的波动性服从正态分布 (简化为 0%、±1%、±2%、±3% 七个离散点)^[11]。对其概率性序列建模与式 (3)、式 (5) 类似, 且节点总负荷的概率性序列为各部分负荷的概率性序列的卷和。

1.3 线路潮流的序列化模拟

线路作为能源传输的通路, 即可正向输电, 也可反向输电, 因此称为双向元件。若已知第 p 次供需平衡过程中的潮流流向时, 输电线路 l 的与潮流流向相同的方向为“前向” l_+ , 逆潮流方向则为“后向” l_- 。设系统线路的正反向额定输送容量均为 C_M , 离散化序列长度为 S_l , 则其正向初始可用容量状态的概率分布为

$$PR_{l_+}^{(0)}(i) = \begin{cases} q, & i = 0 \\ 0, & 0 < i < S_l \\ 1 - q, & i = S_l \end{cases} \quad (6)$$

其中, q 为输电线路潮流越限导致的停运率, 反向概率分布正向相同。

2 含 DG 配电网线路潮流描述

2.1 线路允许潮流可通过率

当系统处于初始状态时, 线路潮流的正反向剩余可用裕度分布为 PR_{l_+} 、 PR_{l_-} 。在第 k 次供需平衡过程中, 输电线路的前向为正方向, 应用序列运算的交积公式得出本次前向的消耗裕度的概率分布为

$$PU_{l_+}^{(k)}(i) = PR_{l_+}^{(k-1)}(i) \otimes PR_{S_{l_+}}^{(k)}(i) \quad i = 0, 1, \dots, S_l \quad (7)$$

其中, $PR_{l_+}^{(k-1)}(i)$ 、 $PR_{S_{l_+}}^{(k)}(i)$ 分别为第 $k-1$ 次平衡过程线路潮流剩余可用裕度概率分布及前向串联元件集中的各元件组成的“等效串联元件”。并有式 (7) 进一步推导出

$$ER_{l_+}^{(k)} = ER_{l_+}^{(0)} - [EC_{l_+}^{(k)} - EC_{l_-}^{(k)}] \quad (8)$$

其中, $E(x)$ 为概率性序列的期望值。式 (8) 表示线路潮流正向当前剩余可用裕度期望值等于初态期望值与其正、反两向累积消耗裕度期望值之差。则定义线路的可用率为剩余可用裕度期望占初态裕度期望的百分比, 即

$$AR_{i+}^{(k)} = (ER_{i+}^{(k)} / ER_{i+}^{(0)}) \times 100\% \quad (9)$$

反向亦同理。设定某个固定的可用率门槛值 δ ，若可用率低于 δ 时，认为线路功率越限，不能再通过潮流并停运。

2.2 线路状态转移因子

DG 注入电网的不确定有功出力及负荷的变化都会引起系统的状态不断发生变化，因此引入状态转移因子描述此种变化的不确定性，从而识别出潮流转移的敏感支路，保证电网合理调度，使线路安全运行。

设在时间 $[0, t]$ 内，将各离散化时刻 DG 或负荷引起的潮流重新分布视为系统状态随时间的转移，由此可定义 t 时刻系统支路 i 上发生的状态转移变化为

$$p_{d-i}^t = p_{d-i}^0 + \Delta p_{f-i}^t \quad (10)$$

式中： p_{d-i}^0 、 p_{d-i}^t 分别表示初始状态和 t 时刻的支路 i 上的潮流状态； Δp_{f-i}^t 表示该时刻 DG 有功的注入或负荷的变化引起支路 i 的潮流变化，考虑负荷为恒功率型特性，规定 DG 所在供应侧引起潮流变化为“+”值，需求侧为“-”值。根据文献[12]，称 t 时刻系统支路 i 的潮流状态转移量与基态系统支路 i 潮流的比值为该条支路的状态转移因子，即

$$\lambda_i^t = \frac{\Delta p_{f-i}^t}{p_{d-i}^0} \quad (11)$$

若给定系统包括 m 条支路，则各支路的状态转移因子序列为

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m] \quad (12)$$

在式 (12) 序列中绝对值最大的即为对应的潮流转移敏感支路，发生潮流越限的可能性最大，需引起调度员重视。

3 系统线路潮流综合分析

3.1 系统潮流的二维等级定性评估

基于序列运算的线路可用率反映了各支路在某时刻承载容量的能力大小，状态转移因子则表明该状态下潮流转移程度的大小。由于线路属于双向元件，正反向剩余可用裕度的期望值之和为恒定，故正反两个方向的可用率之和始终保持为 200%。参与任何一次供需平衡工程都会使对应前向可用率减少，后向可用率增加。为了更直观分析 DG 的接入配电网后对线路安全运行造成的影响，利用线路可用率及状态转移因子二维参数并

设立程度等级对其进行综合分析、评估。

设定线路可用率门槛值 δ 为 10%，则以门槛值为分界点划分 5 个运行等级 $M \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ，如表 1 所示。

从表 1 中可知，等级 3 运行状态稳定性越高，而向两端逐渐接近或达到饱和，威胁配电网安全。需要指出，停运指某个方向达到饱和，在以后的供需平衡过程后有可能重新成为可用方向。

表 1 线路可用率等级划分

运行等级	可用率区间	运行状态
$M=1$	0~10%	正向饱和，停运
$M=2$	10%~70%	正向接近饱和
$M=3$	70%~130%	正反向容量适中
$M=4$	130%~190%	反向接近饱和
$M=5$	190%~200%	正向饱和，停运

线路状态转移因子同样设置 5 个等级 $N \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ，等级越高，潮流转移程度越大。并沿用文献[13]采用公式 (13) 对线路状态转移因子的计算进行归一化处理， Δp_{f-i}^t 在计算过程中取绝对值。由 ϖ 的数值划分各区间并确定状态转移因子的等级。

$$\varpi = \left| \lambda_i^t \right| / \left| \sum_{i=1}^m \lambda_i^t \right| \quad (13)$$

根据归一化后的结果，得出反映线路潮流敏感度的状态转移因子等级描述，如表 2。

表 2 状态转移因子等级划分

状态转移因子等级	转移区间	等级描述
$N=1$	0~0.05	转移比例很小
$N=2$	0.05~0.1	转移比例较小
$N=3$	0.1~0.15	转移比例一般
$N=4$	0.15~0.2	转移比例较大
$N=5$	0.2~1.0	转移比例很大

同时考虑线路可用率和状态转移因子的等级划分，建立线路潮流的二维序列综合分析模型。以两种评估等级的乘积作为判断线路潮流是否处于安全容量范围内并能稳定运行的标准。

表 3 给出了对含 DG 配电网各支路的运行潮流分析指标。从上述对等级的定义中知， $M=3$ ， $N=1$ 时，所在支路的潮流安全性最高； $M=1$ 或 5， $N=5$ 时，所在支路某一方向停运并且敏感度高，处于危险状态；虚线框内为安全度较高的运行指标。

表 3 线路潮流稳定性分析模型

Table 3 Analysis model of line flow stability

状态转移 因子等级	运行等级				
	M=1	M=2	M=3	M=4	M=5
N=1	1	2	3	4	5
N=2	2	4	6	8	10
N=3	3	6	9	12	15
N=4	4	8	12	16	20
N=5	5	10	15	20	25

3.2 线路潮流安全识别模拟过程

通过以上分析方法可知, 当 DG 接入配电网后, 电网运行中调度员需监测 DG 及负荷不确定性所产生线路潮流的变化, 发现危险运行支路并采取一定防范措施。DG 类型以风电为例, 具体模拟步骤如下。

- 1) 设定供应、需求两端的初始可用率, 并确定线路潮流的容量大小。
- 2) 对序列化模型进行初始化潮流计算, 获取各支路基态时的潮流数据。
- 3) 将 DG (本文为风机) 接入配电网, 通过序列运算得出其有功出力的大小及变化。
- 4) 根据配电网结构及供需侧的相关变化, 计算出状态转移因子的大小。
- 5) 更新各支路潮流数据, 监测并得出线路的可用率。
- 6) 通过以上参数, 综合评估整个配电网中存在的不安全运行支路, 并采取有效措施进行调整、控制。

4 算例分析

4.1 系统算例介绍

本算例采用 IEEE34 节点系统进行分析验证^[14]。算例中, 系统的各支路和节点负荷参数为 IEEE34 测试系统标准值; 节点 828、840、846 分别接入小型风电机组, 见图 1。并对该系统采用直流潮流

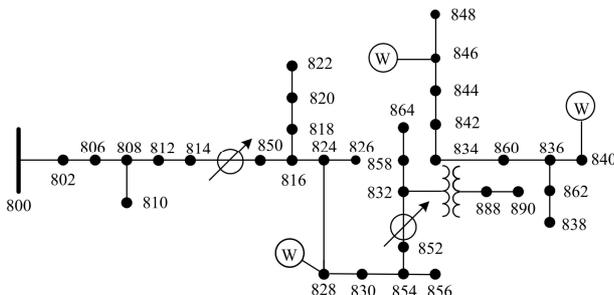


图 1 含 DG 的 IEEE34 节点测试系统

Fig. 1 IEEE34-node test system including DG

的计算方法; 序列运算的离散化步长设为 2 kW, 线路可用率门槛值为 10%。风电机组的出力参数如表 4 所示。

表 4 风电机组出力参数

Table 4 Output parameters of WTGS

风电机组位置	有功出力	预测平均
	预测/kW	误差/%
828	300	12
840	160	15
846	160	15

为更好地对配电网中潮流变化进行分析, 选取系统运行中的 4 个状态。风电机组三个序列段分别状态 1、2、3, 出力和依次为: 160 kW、404.8 kW、713 kW; 节点 800 作为平衡节点, 负荷的节点注入 -694.4 kW 作为状态 4。

4.2 算例分析验证

由于风速的变化产生在配电网中风电机组出力的不确定性, 从而影响潮流变化。采用直流潮流法计算各时段线路潮流, 支路编号由母线节点 800 至 890 的支路分别由 1 到 31 排序; 其中 832 至 888 存在变压器, 线路长度为 0, 因此不予考虑。按照表 4 中抽样三组风电以及注入负荷后的概率性序列, 并根据式 (8)、式 (9) 得出线路的可用率如图 2 所示。

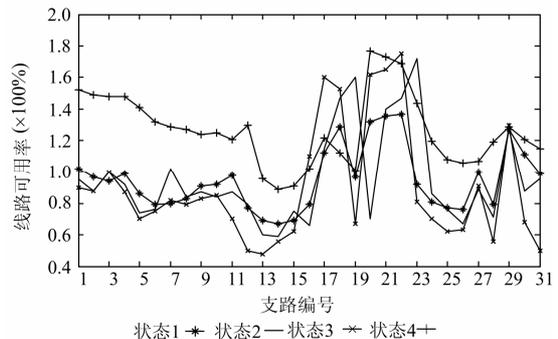


图 2 各支路可用率曲线

Fig. 2 Curves of branch available ratio

从图 2 中可以得出: 状态 1 风电机组出力值最小, 各支路的可用率基本在线路容量适中的范围内波动; 状态 3 风电自己出力值最大, 若干支路已接近正向或者反向饱和; 状态 4 由于负荷的增加, 线路正向可用率大部分在 120% 以上, 若干支路接近反向饱和。从整体分析, 从节点 824 至 844 支路震荡幅度较大, 出现越限的可能性较高, 需引起注意。

图 3 为风电出力注入配电网后状态转移因子的曲线变化, 根据其大小分布从而识别出配电网

中的敏感支路。

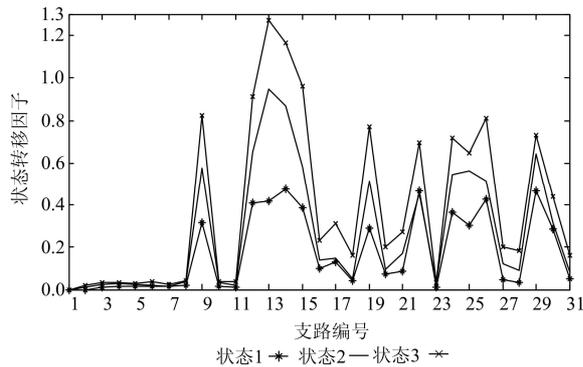


图3 状态转移因子曲线

Fig. 3 Curves of state transition factors

从图3可以看出：各个状态下接近母线电压的状态转移因子几乎为0，系统表现出比较稳定的状态；而支路824-828的转移因子最大，816-824、836-840、854-856三条支路次之，即上述支路为潮流状态转移敏感支路。当节点注入发生较大波动时，应该引起高度重视。

综合对比各支路的可用率曲线和状态转移曲线，发现在配电网系统中，线路的功率越限可能性随着一定风电输出功率的增加而变大；而负载端的变化也将影响线路某方向饱和度的变化以及敏感支路的辨识。通过综合判定，能够及时发现系统中的不稳定线路，进行及时有效的调度，避免危险发生，并优化系统运行，提高效率。

5 结语

本文在对含DG的配电网潮流分析中，针对由于DG出力的不确定性可能导致的功率越限引起安全问题，利用序列运算理论建立系统运行的概率性序列，并通过线路潮流容量的双向可用率以及状态转移因子指标来进一步评估各支路运行情况。为含DG配电网的在线监测提供参考，对诸如提高消纳能力、潮流优化等问题进行更广泛的研究。

参考文献

[1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
LIANG You-wei, HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75.

[2] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 一种改进序列运算算

法及其在风电出力分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 15-19.

LIU De-wei, GUO Jian-bo, HUANG Yue-hui, et al. An improved sequence operation algorithm and its application in wind power analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 15-19.

[3] 张宁, 康重庆, 陈治坪, 等. 基于序列运算的风电可信容量计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 1-9.
ZHANG Ning, KANG Chong-qing, CHEN Zhi-ping, et al. Wind power credible capacity evaluation model based on sequence operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 1-9.

[4] 闫丽梅, 谢明霞, 徐建军, 等. 含分布式电源的配电网潮流改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 17-22.
YAN Li-mei, XIE Ming-xia, XU Jian-jun, et al. Improved power flow calculation of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 17-22.

[5] 吕学勤, 吴辰宁. 含分布式电源的配电网潮流计算改进方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 48-51.
LÜ Xue-qin, WU Chen-ning. Modified power flow calculation method of distribution grid with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 48-51.

[6] 尚璠, 邵能灵, 刘琦, 等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 40-45.
SHANG Jin, TAI Neng-ling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 40-45.

[7] 王奇伟, 姜飞, 马瑞, 等. 基于状态转移的风电并网点下线路潮流分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1880-1886.
WANG Qi-wei, JIANG Fei, MA Rui, et al. Power flow analysis of power grid connected with wind farms based on state transition[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1880-1886.

[8] 陈得治, 张伯明, 方兴, 等. 节点注入功率模式对电

- 压稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 62-67.
- CHEN De-zhi, ZHANG Bo-ming, FANG Xing, et al. Effect of nodal injection power mode on voltage stability margin[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 62-67.
- [9] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 基于序列运算的随机直流潮流改进算法实例分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 8-13.
- LIU De-wei, GUO Jian-bo, HUANG Yue-hui, et al. Improved algorithm and case study for probabilistic DC power calculation based on sequence operation theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 8-13.
- [10] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- KANG Chong-qing, XIA Qing, XU Wei. Uncertainty analysis of power system[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [11] 康重庆, 夏清, 相年德, 等. 序列运算及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- KANG Chong-qing, XIA Qing, XIANG Nian-de, et al. Sequence operation theory and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [12] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于 WAMS 的潮流转移识别算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 14-19.
- XU Hui-ming, BI Tian-zhu, HUANG Shao-feng, et al. WAMS based flow transfer identification algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 14-19.
- [13] 闫常友, 周孝信, 康建东, 等. 潮流转移灵敏度以及安全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 7-13.
- YAN Chang-you, ZHOU Xiao-xin, KANG Jian-dong, et al. Flow transferring sensitivity and security index analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 7-13.
- [14] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[C] // Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, Columbus, USA, 2001: 908-912.

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-05-16

作者简介:

苏胜皓 (1982-), 男, 硕士, 主要从事电网调控方面工作; E-mail: 1753934358@qq.com