

基于改进点估计法的输电线路过负荷风险评估

雷加智, 龚庆武

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对分布式电源输出功率的随机性问题, 提出一种基于改进点估计法的输电线路过负荷风险评估的方法。在传统 $2m$ 及 $2m+1$ 点估计法的基础上, 根据各个输入量的影响因子来选择相应的权重, 改善传统点估计法的计算精度, 实现输电线路的过负荷风险评估。对含风光互补发电单元的 IEEE 30 节点系统中输电线路过负荷风险进行评估, 分析结果表明所提方法具有计算成本低、预测精度比传统点估计法精度高的特点。

关键词: 输电线路; 过负荷; 风险评估; 改进点估计法; 风光互补发电系统

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.010

0 引言

随着能源的日益短缺和环境的日益恶化, 以光伏发电和风力发电为代表的新能源发电系统越来越受到人们的关注^[1]。由于风力发电和光伏发电的互补性, 大型风光互补发电系统是可再生能源的一种高效利用形式^[2-3]。可靠性和安全性是电力系统风险评估的 2 个主要因素, 尤其是目前可再生能源发电单元大量接入的电力系统。光照强度和风速的随机性和间歇性, 使光伏发电和风力发电单元接入电网后带来了许多不确定性的因素, 如何量化评价这些不确定性因素对输电网供电可靠性的影响值得深入研究^[4]。

点估计法是一种根据随机函数中输入变量的概率分布来求取随机函数的各阶中心矩的概率统计方法。相比于蒙特卡罗模拟法等估计法, 点估计法的计算成本大幅降低, 计算精度略低, 因而在工程系统不确定性问题的研究中得到了广泛的应用。

文献[5-6]详细介绍了点估计法的计算原理, 并给出了 $2m$ 及 $2m+1$ 这 2 种典型的传统点估计法的基本计算过程。文献[7]针对电压稳定概率评估中难以考虑支路故障随机性的问题, 将典型的传统点估计法应用于电力系统电压稳定性的分析中, 取得了很好的分析效果。文献[8]利用 3 种点估计法完成了功率潮流的估算, 与蒙特卡罗模拟法的估计结果做比较, 分析了 $2m$ 、 $2m+1$ 、 $4m+1$ 点估计法的误差与计算成本。文献[9]基于分布式电源输出功率的随机性问题, 提出基于点估计法的含分布式电源的配电网可靠性评估模型。这些文献充分体现了点估计法的广泛应用, 但都是基于传统点估计法, 没有考

虑传统点估计法中各个输入量之间权重的问题, 因此点估计法的计算精度并没有得到大幅改善。

文献[10-11]详细介绍了新能源独立互补发电系统的控制策略及储能系统容量优化配置方法, 但是没有考虑新能源接入电力系统后的功率潮流稳定性问题。文献[12-13]利用传统点估计法完成了电力系统负荷潮流的计算, 但是没有涉及含风力、光伏等新能源的电力系统潮流计算。文献[14-15]利用传统点估计法考虑了风力发电单元接入电力系统后的配电网过负荷风险评估, 但并没有考虑风光互补发电单元接入的情况。新能源的接入对风光互补发电系统中输电线路过负荷风险会产生很大的影响^[16], 因此有必要对输电线路过负荷风险进行快速评估, 并提高评估的精度^[17]。

本文首先改进了 $2m$ 及 $2m+1$ 这 2 种传统的点估计法, 并提出了一种改进的点估计法。分析了风光互补系统中光伏发电及风力发电单元输出功率的影响因子, 根据各自的影响因子, 提出了一种基于改进点估计法的风光互补系统中输电线路过负荷风险评估的方法。最后利用实例验证了所提的风光互补系统中输电线路过负荷风险评估的方法具有计算成本低、预测精度比传统点估计法精度高的特点。

1 点估计法

点估计法的数学原理可以描述成: 由 m 个随机输入变量 $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ 构成随机函数 $Z=F(X)=F(X_1, X_2, \dots, X_m)$, 当随机变量 (X_1, X_2, \dots, X_m) 的概率密度分布已知时, 如何高效求取随机函数 $F(X)$ 的估计值 $E(Z)$ 。

1.1 点估计法的构建

通过随机输入变量 X_i 的概率密度分布 $f(x_i)$ 得到其高阶中心矩, 利用这些高阶中心矩构造出表征 X_i 概率分布特征的 K 个估计点 $x_{i,k} (k=1, 2, \dots, K)$, 即:

收稿日期: 2016-06-28; 修回日期: 2017-01-21
基金项目: 南方电网公司重点科技项目 (GZ2014-2-0049)
Project supported by Science & Technology Project of CSPG (GZ2014-2-0049)

$$E(Z^j) \approx \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} F^j(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{i,k}, \dots, \mu_{X_m}) \quad (1)$$

其中, j 为 Z 的次方数; μ_{X_i} 为输入变量 X_i 的期望值; $\omega_{i,k}$ 为 X_i 在点 $x_{i,k}$ 处的权重值。令:

$$x_{i,k} = \mu_{X_i} + \xi_{i,k} \sigma_{X_i} \quad i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, 2K-1 \quad (2)$$

其中, σ_{X_i} 为输入变量 X_i 的标准差。 $\xi_{i,k}$ 及 $\omega_{i,k}$ 的值可以通过式(3)得到:

$$\sum_{k=1}^K \omega_{i,k} \xi_{i,k}^j = \lambda_{i,j} \quad j=1, 2, \dots, 2K-1 \quad (3)$$

$$\lambda_{i,j} = E[(x_i - \mu_{X_i})^j] / \sigma_{X_i}^j \quad (4)$$

传统的点估计法中,一般都认为各个输入量的权重和相同,即:

$$\sum_{k=1}^K \omega_{i,k} = \frac{1}{m} \quad (5)$$

根据式(3)~(5)可以计算得到 $\xi_{i,k}$ 和 $\omega_{i,k}$ 的值,结合式(2)可以得到 $x_{i,k}$,再利用式(1)就可以估算出 $E(Z^j)$ 的值。当 $K=2$ (2m 点估计法)时以及当 $K=3$ 且 $\xi_{i,3}=0$ (2m+1 点估计法)时,传统点估计法的结果已在文献[5-6]中详细地给出,本文中不再赘述。

1.2 点估计法的改进

为了计算方便,传统的点估计法一般都认为各个输入量 X_i 的权重相同,即式(5),实际中,各个输入量 X_i 对输出量 Z 的影响程度不一样,因而式(5)在实际应用中并不普适,需要对式(5)进行探讨。假设第 i 个输入量 X_i 的影响权重为 α_i ,则有:

$$\sum_{k=1}^K \omega_{i,k} = \alpha_i \quad (6)$$

根据式(6)以及传统点估计法的式(3)、(4),可以计算出改进后的点估计法的参数。

对于 2m 点估计法,修正后的参数为:

$$\begin{aligned} \xi_{i,1} &= \frac{\lambda_{i,3}}{2} + \sqrt{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{\lambda_{i,3}}{2}\right)^2} \\ \xi_{i,2} &= \frac{\lambda_{i,3}}{2} - \sqrt{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{\lambda_{i,3}}{2}\right)^2} \\ \omega_{i,1} &= -\frac{\alpha_i \xi_{i,2}}{\xi_{i,1} - \xi_{i,2}}, \quad \omega_{i,2} = \frac{\alpha_i \xi_{i,1}}{\xi_{i,1} - \xi_{i,2}} \end{aligned} \quad (7)$$

对于 2m+1 点估计法,修正后的参数为:

$$\begin{aligned} \xi_{i,1} &= \frac{\lambda_{i,3}}{2} + \sqrt{\lambda_{i,4} - \frac{3}{4} \lambda_{i,3}^2} \\ \xi_{i,2} &= \frac{\lambda_{i,3}}{2} - \sqrt{\lambda_{i,4} - \frac{3}{4} \lambda_{i,3}^2} \\ \omega_{i,1} &= \frac{1}{\xi_{i,1}(\xi_{i,1} - \xi_{i,2})}, \quad \omega_{i,2} = -\frac{1}{\xi_{i,2}(\xi_{i,1} - \xi_{i,2})} \\ \omega_{i,3} &= \alpha_i - \frac{1}{\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

一般情况下,式(6)中权重值 α_i 可以根据各个输入量 X_i 对输出量 Z 的影响程度,通过层次分析法或者输入量 X_i 的额定容量来确定。本文采用输入量

X_i 的额定容量所占的百分比来确定 α_i 的值。

2 输电线路的潮流计算

根据式(1),要估算出输电线路 l 的线路潮流值 $E(Z_l)$,必须计算出 $F(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{l,k}, \dots, \mu_{X_m})$ 的值,即在输入量 X_i 的值一定时,计算出输电线路 l 的线路潮流值 $F(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{l,k}, \dots, \mu_{X_m})$ 。

假设风光互补发电系统由 m_1 个风力发电单元、 m_2 个光伏发电单元、 m_3 个常规发电单元以及 m_4 个电力负荷组成,那么:

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m \quad (9)$$

输入量 X_i ($i=1, 2, \dots, m$) 分别为风光互补发电系统中各个组成单元的功率输出, μ_{X_i} ($i=1, 2, \dots, m$)、 σ_{X_i} ($i=1, 2, \dots, m$) 分别为输入变量 X_i 的期望、标准差。根据各个组成单元的功率输出值,就可以计算出线路 l 的线路潮流值 $F(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{l,k}, \dots, \mu_{X_m})$ 。

2.1 风力发电单元输出功率

风力发电单元的输出主要受风速 v 的影响,大量的研究^[18]表明风力发电单元的输出功率为:

$$P_i^w = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad i=1, 2, \dots, m_1 \quad (10)$$

其中, ρ 为空气的密度; A 为风机上涡轮叶片扫过的面积; C_p 为无量纲的功率系数。

一般情况下,风速的概率密度函数可以通过威布尔分布来描述,即:

$$f_i(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (11)$$

其中, k 为形状系数; c 为比例系数。通常,只考虑风速对风力发电单元输出功率的影响,在已知风速的情况下,根据式(10)就可以计算出风力发电单元的输出功率。

2.2 光伏发电单元输出功率

影响光伏发电单元输出功率的因素有很多,主要有光照强度 I 、光伏电池阵列面积 S 和光电转换效率 η 。一般情况下,光伏发电单元的输出功率为:

$$P_i^p = I_i S_i \eta_i \quad i=1, 2, \dots, m_2 \quad (12)$$

本文只考虑光照强度对光伏发电单元输出功率的影响,一般光照强度 I 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$,即:

$$f_i(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(I-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (13)$$

在已知光照强度 I 的情况下,根据式(12)就可以计算出光伏发电单元的输出功率。

3 输电线路的风险评估

3.1 输电线路过负荷评估

输电线路 l 功率潮流值的期望 μ_{Z_l} 和方差 σ_{Z_l} 可以通过 1.2 节中改进的点估计法的估算结果得

出,即:

$$\mu_{Z_l} = E[Z_l], \sigma_{Z_l} = \sqrt{E(Z_l^2) - \mu_{Z_l}^2} \quad (14)$$

已知输电线路功率潮流值服从正态分布的情况,就可以得到输电线路实际功率潮流的概率密度函数 $f(Z_l)$ 。

为了对输电线路的过负荷风险进行评估,必须建立输电线路过负荷的严重度函数,如图1所示。

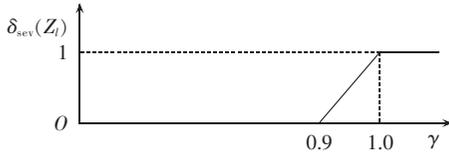


图1 输电线路过负荷的严重度函数
Fig.1 Severity function of transmission line overload

图1中, γ 为线路的实际线路潮流和额定线路潮流 P_{el} 的比值。根据图1,可以得到线路过负荷的严重度函数 $\delta_{sev}(Z_l)$:

$$\delta_{sev}(Z_l) = \begin{cases} 10\gamma - 9 & \gamma > 0.9 \\ 0 & \gamma \leq 0.9 \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)以及线路 l 的实际功率潮流概率密度函数 $f(Z_l)$,可以计算出线路 l 的风险评估值 $C_{risk}(Z_l)$,即:

$$C_{risk}(Z_l) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(Z_l) \delta_{sev}(Z_l) dZ_l \quad (16)$$

计算整个线路的风险评估值:

$$C_{risk}(Z) = \sum C_{risk}(Z_l) \quad (17)$$

3.2 风险评估的计算流程

根据前面的论述,可以得到线路过负荷风险评估的计算流程:

a. 初始化,选择第 $l(l=1,2,\dots,L,L$ 为线路的条数)条输电线路;

b. 选择各个输入量 X_i ,根据输入量 X_i 的额定值所占的百分比计算相应的权重值 α_i ;

c. 根据输入量 X_i 的影响因子 β_i (风速和光照强度)的概率密度函数,计算 β_i 的 n 阶中心距;

d. 选择改进的点估计算法($2m$ 或者 $2m+1$),根据计算的权重值 α_i 计算 $\xi_{i,k}$ 和 $\omega_{i,k}$ 的值,并且得到 $\beta_{i,k} = \mu_{\beta_i} + \xi_{i,k} \sigma_{\beta_i}$;

e. 根据 $\beta_{i,k}$ 的值,计算输入量 X_i 的值 $x_{i,k}$;

f. 根据 $\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{i,k}, \dots, \mu_{X_m}$ 计算线路 l 的功率潮流 $F(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, x_{i,k}, \dots, \mu_{X_m})$;

g. 重复步骤 **c—f** 的过程,直到 $k=K(2m$ 法中 $K=2, 2m+1$ 法中 $K=3)$;

h. 重复步骤 **b—f** 的过程,直到 $i=m$,并按照式(1)计算 $E(Z^j)$ 的值;

i. 根据 $E(Z^j)$ 估算出线路 l 的功率潮流 Z_l 的期望和方差,并得到 Z_l 的概率密度函数;

j. 根据式(16)计算得出线路 l 的风险评估值 $C_{risk}(Z_l)$;

k. 重复上面的过程,直到将所有线路的风险值都计算出来为止,并根据式(17)计算整个输电系统的风险值。

风光互补系统中输电线路风险评估的计算流程图如图2所示。

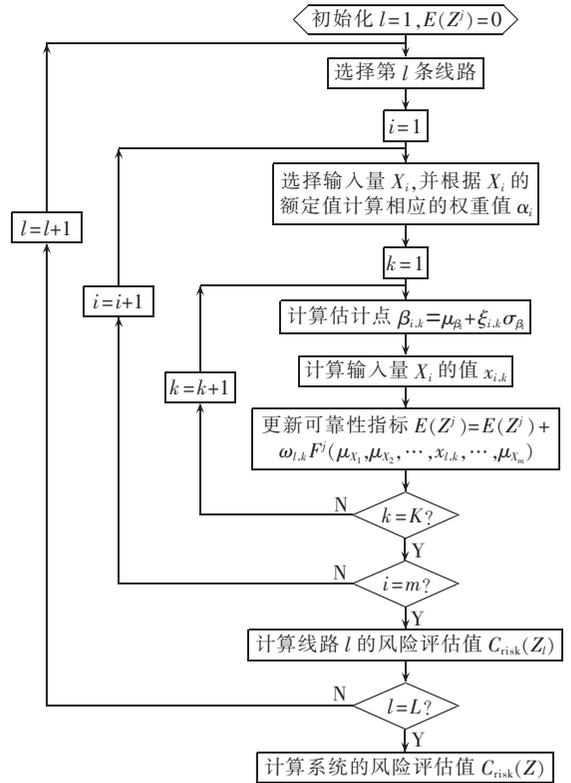


图2 输电线路过负荷风险评估的计算流程图
Fig.2 Flowchart of transmission line overload risk assessment

4 算例分析

为验证所提出方法的正确性,基于图3所示的IEEE 30节点的风光互补发电系统用于输电线路的过负荷风险评估。

图3中,光伏发电单元为光伏1和光伏2,额定功率分别为8 MW和10 MW,风力发电单元为风电1和风电2,额定功率分别为12 MW和10 MW。为了计算方便,统一使用基准值,基准功率为100 MV·A,系统的其他参数参考文献[19]。

为了便于验证,本文不考虑负荷和常规发电单元的随机性,即将负荷和常规发电单元的输出功率视为固定值,只考虑光伏发电以及风力发电单元的随机性对线路过负荷风险的影响。假定光伏1和光伏2的光照强度分别服从正态分布 $N(1750, 120^2)$ 、 $N(1730, 150^2)$ 。风力发电单元的风速 v 服从威布尔分布,风电1的风速 v_1 的形状参数 $k_1=6.25$,比例参

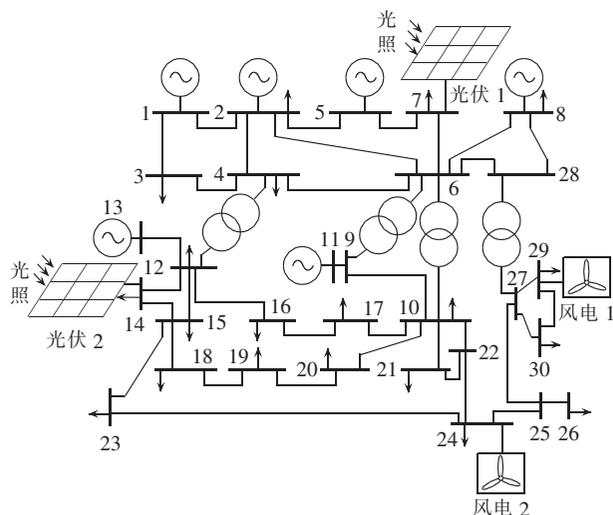


图 3 基于 IEEE 30 节点系统的风光互补发电系统

Fig.3 IEEE 30-bus system with wind-solar complementary electricity-generating system

数 $c_1=10.45$; 风电 2 的风速 v_2 的形状参数 $k_2=5.17$, 比例参数 $c_2=9.85$ 。

表 1 为 IEEE 30 节点系统中各线路功率潮流的额定容量值,只列出了选取的 9 条线路的额定负荷潮流。

表 1 各线路的额定负荷潮流
Table 1 Rated power-flow of transmission line

线路 l	额定容量值	线路 l	额定容量值
2-5	0.5615	15-23	0.0527
3-4	0.4316	10-17	0.2631
6-28	0.3243	21-22	0.0582
12-16	0.0519	23-24	0.0318
9-10	0.3742		

4.1 线路功率潮流的点估计

假定各条线路的功率潮流输出值均服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 选定 $2m$ 点估计法, 并利用图 2 中的输电线路过负荷风险评估的计算流程, 可以得到各条线路功率潮流的点估计结果, 如表 2 所示。需要特别指出的是, 在 3.2 节的步骤 f 计算中, 根据各个光伏发电单元以及风力发电单元的固定输出值, 可以在 Simulink 下搭建相应的 IEEE 30 节点系统模型, 从而计算得出相应的线路实际功率潮流的点估计值。

表 2 的点估计分 3 种情况: 情况 1 中, 4 个输入量 X_i (风力发电及光伏发电单元的输出功率) 的权重值 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=0.25$, 即传统的点估计方法; 情况 2 中, 输入量 X_i 的权重值 α_i 按照输入量 X_i 的额定容量所占的百分比来确定 (如 1.2 节所述), 即风力发电单元 1 的权重值 $\alpha_1=8/(8+12+10+10)=0.2$, 风力发电单元 2 的权重值 $\alpha_2=10/(8+12+10+10)=0.25$, 光伏发电单元 1 的权重值 $\alpha_3=0.3$, 光伏发电单元 2 的

表 2 各线路实际功率潮流

Table 2 Practical power-flows of transmission line

线路 l	功率潮流点估计结果		
	情况 1	情况 2	情况 3
2-5	$\mu=0.4689$, $\sigma=0.0377$	$\mu=0.4698$, $\sigma=0.0373$	$\mu=0.4721$, $\sigma=0.0363$
3-4	$\mu=0.3697$, $\sigma=0.0313$	$\mu=0.3710$, $\sigma=0.0307$	$\mu=0.3747$, $\sigma=0.0302$
6-28	$\mu=0.2768$, $\sigma=0.0203$	$\mu=0.2774$, $\sigma=0.0206$	$\mu=0.2783$, $\sigma=0.0201$
12-16	$\mu=0.0418$, $\sigma=0.0037$	$\mu=0.0422$, $\sigma=0.0035$	$\mu=0.0423$, $\sigma=0.0035$
9-10	$\mu=0.2948$, $\sigma=0.0270$	$\mu=0.2952$, $\sigma=0.0268$	$\mu=0.2960$, $\sigma=0.0265$
15-23	$\mu=0.0427$, $\sigma=0.0038$	$\mu=0.0429$, $\sigma=0.0037$	$\mu=0.0432$, $\sigma=0.0036$
10-17	$\mu=0.2207$, $\sigma=0.0192$	$\mu=0.2210$, $\sigma=0.0190$	$\mu=0.2215$, $\sigma=0.0189$
21-22	$\mu=0.0477$, $\sigma=0.0043$	$\mu=0.0479$, $\sigma=0.0042$	$\mu=0.0481$, $\sigma=0.0041$
23-24	$\mu=0.0248$, $\sigma=0.0029$	$\mu=0.0249$, $\sigma=0.0029$	$\mu=0.0251$, $\sigma=0.0028$

权重值 $\alpha_4=0.25$, 即改进点估计法; 情况 3 为蒙特卡罗模拟法的估计值。

根据表 2 仿真的结果可知, 情况 2 的仿真结果更接近情况 3 的仿真结果。以线路 3-4 为例进行说明, 3 种情况下的点估计结果如图 4 所示。

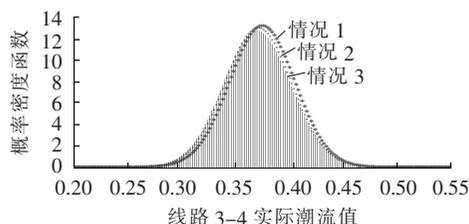


图 4 线路 3-4 功率潮流的概率密度函数

Fig.4 Power-flow probability density function of line 3-4

根据图 4 可以看到, $2m$ 点估计法的估计结果和蒙特卡罗模拟法的估计结果相近, 但是情况 2 下的 $2m$ 点估计结果更接近情况 3 的蒙特卡罗模拟结果, 即改进的 $2m$ 点估计法的结果比传统的 $2m$ 点估计法更接近蒙特卡罗模拟的结果, 这充分说明了本文所提的改进点估计法比传统的点估计法的精度更高。

同理, 选择 $2m+1$ 点估计法, 在 3 种情况下可以得到各条线路功率潮流的点估计结果, 如表 3 所示。

根据表 3 仿真的结果, 以线路 3-4 为例, 3 种情况下的估计结果如图 5 所示。

根据图 5 可以看到, $2m+1$ 点估计法的估计结果和蒙特卡罗模拟法的估计结果非常相近, 但是情况 2 下的 $2m+1$ 点估计结果更接近情况 3 的蒙特卡罗模拟结果, 即改进的 $2m+1$ 点估计法的结果比传

表 3 各线路实际功率潮流

Table 3 Practical power-flows of transmission line

线路 l	功率潮流点估计结果		
	情况 1	情况 2	情况 3
2-5	$\mu=0.4710,$ $\sigma=0.0366$	$\mu=0.4718,$ $\sigma=0.0364$	$\mu=0.4721,$ $\sigma=0.0363$
3-4	$\mu=0.3738,$ $\sigma=0.0305$	$\mu=0.3743,$ $\sigma=0.0303$	$\mu=0.3747,$ $\sigma=0.0302$
6-28	$\mu=0.2780,$ $\sigma=0.0204$	$\mu=0.2781,$ $\sigma=0.0202$	$\mu=0.2783,$ $\sigma=0.0201$
12-16	$\mu=0.0421,$ $\sigma=0.0036$	$\mu=0.0423,$ $\sigma=0.0035$	$\mu=0.0423,$ $\sigma=0.0035$
9-10	$\mu=0.2957,$ $\sigma=0.0266$	$\mu=0.2958,$ $\sigma=0.0266$	$\mu=0.2960,$ $\sigma=0.0265$
15-23	$\mu=0.0431,$ $\sigma=0.0036$	$\mu=0.0432,$ $\sigma=0.0036$	$\mu=0.0432,$ $\sigma=0.0036$
10-17	$\mu=0.2212,$ $\sigma=0.0190$	$\mu=0.2213,$ $\sigma=0.0190$	$\mu=0.2215,$ $\sigma=0.0189$
21-22	$\mu=0.0479,$ $\sigma=0.0042$	$\mu=0.0481,$ $\sigma=0.0041$	$\mu=0.0481,$ $\sigma=0.0041$
23-24	$\mu=0.0250,$ $\sigma=0.0028$	$\mu=0.0251,$ $\sigma=0.0028$	$\mu=0.0251,$ $\sigma=0.0028$

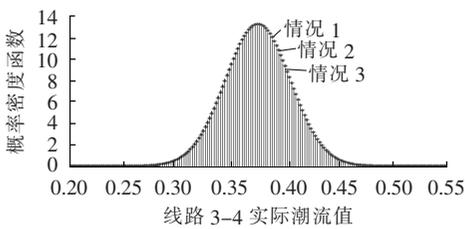


图 5 线路 3-4 功率潮流的概率密度函数

Fig.5 Power-flow probability density function of line 3-4

统的 $2m+1$ 点估计法更接近蒙特卡罗模拟的结果,这进一步说明了本文所提的改进点估计法比传统的点估计法的精度更高。

4.2 过负荷风险评估

根据表 1 及表 2 的结果,结合式(15)、(16),可以得到各线路传统、改进 $2m$ 点估计法及蒙特卡罗模拟法的过负荷风险评估结果,如表 4 所示。

表 4 线路过负荷风险评估

Table 4 Assessment of transmission line overload risk

序号	线路 l	风险评估值		
		情况 1	情况 2	情况 3
1	2-5	0.05956	0.06047	0.06305
2	3-4	0.09829	0.10058	0.11889
3	6-28	0.08319	0.09039	0.09235
4	12-16	0.03064	0.03146	0.03341
5	9-10	0.01864	0.01865	0.01898
6	15-23	0.03688	0.03746	0.04033
7	10-17	0.08120	0.08216	0.08499
8	21-22	0.05186	0.05287	0.05395
9	23-24	0.04001	0.04306	0.04388
总计		1.90457	1.92384	1.93472

以蒙特卡罗模拟法的风险评估值为参考,可以

得到传统 $2m$ 点估计法和改进 $2m$ 点估计法下各线路的过负荷风险评估值的误差 δ_1 ,如图 6 所示。

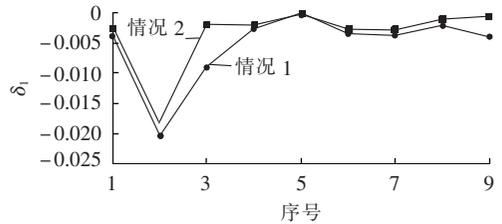


图 6 2 种 $2m$ 点估计法的误差分析

Fig.6 Error analysis for traditional and improved $2m$ point estimation methods

由图 6 可知,情况 2 的 $2m$ 点估计结果的误差比情况 1 的误差小,即改进的点估计法下输电线路过负荷风险评估值的精度更高。

同理,根据表 1 及表 3 的结果,结合式(15)、(16),可以得到各线路 $2m+1$ 点估计法及蒙特卡罗模拟法的过负荷风险评估结果,如表 5 所示。

表 5 线路过负荷风险评估

Table 5 Assessment of transmission line overload risk

序号	线路 l	风险评估值		
		情况 1	情况 2	情况 3
1	2-5	0.06099	0.06256	0.06305
2	3-4	0.11553	0.11713	0.11889
3	6-28	0.09179	0.09201	0.09235
4	12-16	0.03291	0.03341	0.03341
5	9-10	0.01882	0.01898	0.01898
6	15-23	0.03961	0.04033	0.04033
7	10-17	0.08371	0.08450	0.08499
8	21-22	0.05287	0.05395	0.05395
9	23-24	0.04070	0.04388	0.04388
总计		1.92485	1.93101	1.93472

同理,以蒙特卡罗模拟法的风险评估值为参考,可以得到 2 种 $2m+1$ 点估计法的过负荷风险评估值的误差 δ_2 ,如图 7 所示。

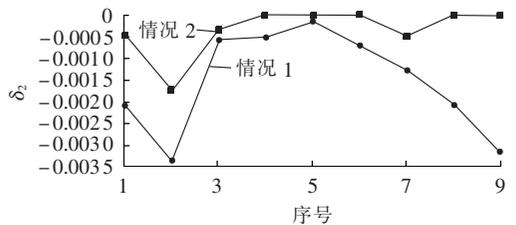


图 7 2 种 $2m+1$ 点估计法的误差分析

Fig.7 Error analysis for traditional and improved $2m+1$ point estimation methods

由图 7 可以看出,2 种 $2m+1$ 点估计结果的误差都很小,但是改进的 $2m+1$ 点估计法的风险评估值精度更高。

图 6 和图 7 的误差分析充分说明了改进的点估计法在精度上要优于传统的点估计法。比较图 6 和图 7 可以看到, $2m+1$ 点估计法的精度比 $2m$ 点估

计法的精度要高。此外,虽然蒙特卡罗模拟法的精度比点估计法略高,但是点估计法的计算量大幅小于蒙特卡罗模拟法,而改进点估计法和传统点估计法的计算量几乎是一致的。

5 结论

点估计法在分布式电源出力不确定性对输电网风险评估上有着广泛的应用。针对输电线路过负荷的风险评估,本文提出了一种改进的点估计法,考虑了各个输入量的影响因子对权重的影响,从而改善了传统点估计法的计算精度。算例结果表明:相比于传统的点估计法,所提的改进点估计法具有计算量小、预测精度比传统点估计法精度高的特点,能够很好地用于风光互补系统中输电线路过负荷的风险评估。

参考文献:

- [1] 蔡国伟,孔令国,杨德友,等. 大规模风光互补发电系统建模与运行特性研究[J]. 电网技术,2012,36(1):65-71.
CAI Guowei,KONG Lingguo,YANG Deyou,et al. Research on modelling and operation characteristics analysis of large-scale wind & light complementary electricity-generating system[J]. Power System Technology,2012,36(1):65-71.
- [2] LIU Chunhua,CHAU K T,ZHANG Xiaodong. An efficient wind-photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(3):831-839.
- [3] PARK S J,KANG B B,YOON J P,et al. A study on the stand-alone operating or photovoltaic/wind power hybrid generation system[C]//Proceedings of the 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Nanjing,China:IEEE,2004:1631-1634.
- [4] 康龙云,郭红霞,吴捷,等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术,2010,34(11):43-47.
KANG Longyun,GUO Hongxia,WU Jie,et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology,2010,34(11):43-47.
- [5] MILLER A C,RICE T R. Discrete approximations of probability distributions[J]. Management Science,1983,29:352-363.
- [6] HONG H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety,1998,59(3):261-267.
- [7] MORALES J M,PEREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,4(22):1594-1601.
- [8] 吴蓓,张焰,陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):38-43.
WU Bei,ZHANG Yan,CHEN Minjiang. Application of point estimate method to voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):38-43.
- [9] 芦晶晶,赵渊,赵勇帅,等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法[J]. 电网技术,2013,37(8):2250-2257.
LU Jingjing,ZHAO Yuan,ZHAO Yongshuai,et al. A point estimation method for reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology,2013,37(8):2250-2257.
- [10] 杨秀媛,黄丹,申洪. 多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):156-162.
YANG Xiuyuan,HUANG Dan,SHEN Hong. Research on control strategy of multi-energy complementary isolated power system[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):156-162.
- [11] 徐林,阮新波,张步涵,等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):88-98.
XU Lin,RUAN Xinbo,ZHANG Buhang,et al. An improved optimal sizing method for wind-solar hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):88-98.
- [12] SU C L. Probabilistic load-flow computation using point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1843-1851.
- [13] VERBIC G,CANIZARES C A. Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4):1883-1893.
- [14] USAOLA J. Probabilistic load flow with correlated wind power injections[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(5):528-536.
- [15] LI Xue,ZHANG Xiong,WU Lei,et al. Transmission line overload risk assessment for power systems with wind and load-power generation correlation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(3):1233-1242.
- [16] 王增平,戴志辉. 含风力发电的配网电流保护运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):7-12.
WANG Zengping,DAI Zhihui. Operation risk assessment for current protection of distribution network with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):7-12.
- [17] 刘健,韩磊,张志华. 面向用户并考虑紧迫性的配电网运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):97-102,109.
LIU Jian,HAN Lei,ZHANG Zhihua. Power system reliability analysis considering substation interior[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):97-102,109.
- [18] LI X,PEI J X,ZHANG S H. A probabilistic wind farm model for probabilistic load flow calculation [C]//Power & Energy Engineering Conference. Chengdu,China:[s.n.],2010:1-4.
- [19] 冯士刚,艾芊. 利用强度 Pareto 进化算法的多目标无功优化[J]. 高电压技术,2007,33(9):115-119.
FENG Shigang,AI Qian. Multi-objective reactive power optimization using SPEA2[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):115-119.

作者简介:



雷加智

雷加智(1988—),男,湖北大冶人,博士研究生,研究方向为电力系统风险评估(**E-mail**: lei jiachi@126.com);

龚庆武(1967—),男,湖南新邵人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等(**E-mail**: qwgong@whu.edu.cn)。

(下转第 81 页 continued on page 81)

a review and a new GMPPT ESC scheme[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57(1):524-539.

[18] MOURA S J, CHANG Y A. Lyapunov-based switched extremum seeking for photovoltaic power maximization[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(7):971-980.

[19] QIN S, CADY S T, DOMINGUEZ-GARCIA A D, et al. A distributed approach to maximum power point tracking for photovoltaic submodule differential power processing[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4):2024-2040.

作者简介:



彭 飞

彭 飞(1986—),男,山东莱州人,工程师,博士,主要从事可再生能源接入配电网的协同控制以及系统稳定性研究(E-mail: kilmer_pf@126.com);

刘志祥(1980—),男,四川宜宾人,研究员,博士,从事可再生能源发电技术及其应用研究。

PV/Li-ion energy-storage power module based on non-balancing cell management and its MPPT control

PENG Fei¹, LIU Zhixiang², REN Jingguo¹, CHEN Yufeng¹, LIU Yao³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250002, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the energy-efficiency loss due to the strict voltage matching between PV (PhotoVoltaic) panel and Li-ion battery cell, the shadow effect of serial PV cells and the earth leakage effect induced by the high switching-frequency coupling of power converter, a modified topology of NBCM (Non-Balancing Cell Management)-based PV/Li-ion energy-storage power module is proposed. Its control section is composed of a first-stage PV cell adaptive voltage balancing unit and a second-stage SFBB (SEPIC Fed Buck-Boost) conversion unit, for which, a 2-LyapESC MPPT (Maximum Power Point Tracking) control strategy based on ESC (Extremum Seeking Control) and Lyapunov switching coupling control is proposed to improve the MPPT output energy-efficiency of serial PV cells and optimize the energy management of power module. Simulative results verify the effectiveness of the proposed topology and MPPT control strategy.

Key words: photovoltaic cells; non-balancing cell management; adaptive voltage balancing; SEPIC fed Buck-Boost; MPPT; extremum seeking control; Lyapunov switching control

(上接第 72 页 continued from page 72)

Transmission line overload risk assessment based on improved point estimation methods

LEI Jiazhi, GONG Qingwu

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the output power randomness of DG (Distribution Generation), a method based on the improved point estimation is proposed to assess the transmission line overload risk of transmission network. Based on the traditional $2m$ and $2m+1$ point estimation methods, the weight of each input variable is determined according to its influence factor to improve the computational accuracy of traditional point estimation method for the overload risk assessment of transmission network. The transmission line overload risk of IEEE 30-bus transmission network with wind-solar complementary electricity-generating units is assessed and results show that, the proposed method has lower computational cost and higher forecasting accuracy than traditional point estimation method.

Key words: transmission line; overload; risk assessment; improved point estimation method; wind-solar complementary electricity-generating system