

基于序贯蒙特卡洛法的直流配电网 可靠性评估与预测

李 江¹, 刘伟波¹, 李国庆¹, 支 新², 欧阳斌², 陈翔雁²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 江西省赣西供电公司, 新余 338025)

摘 要: 针对接地系统+双极运行的直流配电网,通过分析系统运行方式、元件寿命、分布式电源输出功率等方面对电网可靠性的作用机理,并基于校正模型和序贯蒙特卡洛法,利用模拟数据与历史数据,实现直流配电网的可靠性评估与校正以及可靠性预测值的空间特性分析与研究;最后,利用校正模型偏差和故障率预测参数对其未来10年可靠性进行预测,分析预测值的空间分布特性,算例证明了该方法的有效性。

关键字: 直流配电网; 运行方式; 元件寿命; 可靠性预测模型; 序贯蒙特卡罗法

中图分类号: TM72

文献标识码: A

0 引 言

从1883年Edison建立世界上第一个小型直流电网,到1886年Sprague率先提出交流配电系统,配电网以何种方式供电的争论不断。从19世纪末至今100多年间,交流系统凭借其传输方便、灭弧快速等优点在电力供应中一直占据着统治地位^[1-3]。然而,随着电力电子技术的快速发展,光伏发电和储能等具有直流属性的元件使用比重的逐步提高,直流供电的优势开始逐渐突显,直流供电系统分析逐渐成为国内外专家学者的研究热点。

供电可靠性是电力公司关注的重要指标,涉及用户、电力公司等多方利益^[4]。常见的交流系统元件均是机械式,故障率较低,而直流系统大部分是电子和电磁式元件,故障率高^[5]。针对直流电网,文献[6]提出交直流混合系统的低压配电网结构,并对该系统的安全性、最大传输功率、电能质量和经济性进行分析,结果显示直流配电网性能明显优于交流配电网;文献[7]提出各类接入分布式电源的直流供电方式结构,并对环形结构的直流配电网和交流配电网进行仿真比较,结果显示直流配电网对提高电能质量和分布式电源的效率更佳;文献[8]

提出直流配电网关键元件之一的全桥型直流变压器模型,并对该模型进行仿真分析,提出直流电压控制和变换方法。而作为直流配电系统重要评价指标的可靠性评估研究相对较少,也没有提出适用于直流配电网可靠性分析的方法和指标。目前,研究直流系统可靠性最多的仍是通信供电系统、舰船供电系统和太空飞行器^[9-11],大部分均未考虑电力电子元件可靠性的影响,也未考虑交直流元件的区别,尚不能预测大系统可靠性。

为更加科学准确评估配电网的技术优势和可能遇到的障碍,本文利用校正模型,分析直流配电网可靠性的空间分布特性;同时通过预测运行方式、元件故障率和分布式电源对供电可靠性的影响,对系统可靠性进行了预测分析。

1 直流配电网拓扑结构

直流配电网可根据负荷可靠性要求、投资成本等实际约束,选择合适的结构进行设计。国内外学者提出的直流配电网拓扑主要有辐射状、环状和两端配电等结构^[3,12,13]。和交流配电网的结构类似,辐射状结构系统的供电可靠性相对较低,但经济性和保护控制简单;环状和两端供电结构系统的可靠性相对较高,但经济性较差、系统结构复杂。

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家电网公司科技发展规划(201590); 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2014108)

通信作者: 刘伟波(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网可靠性分析方面的研究。925061063@qq.com

考虑当前配电网多采用闭环设计、开环运行的特点,同时参考直流配电网的相关文献^[14,15],拓扑结构采用双极运行方式+接地系统的辐射状结构系统,结构如图1所示。当采用如图所示的双极运行结构时,若只发生一条线路故障,系统仍可通过单极运行方式进行供电,从而提高系统的可靠性。

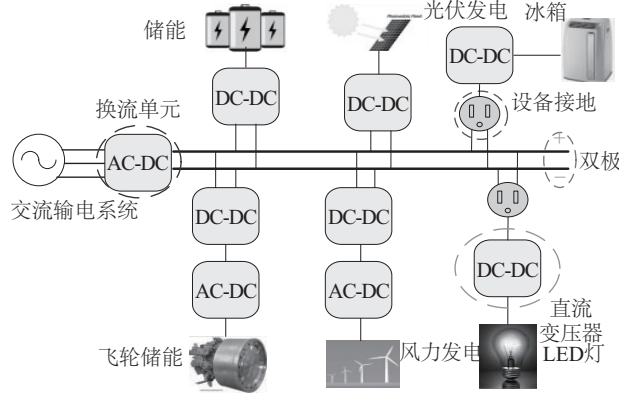


图1 直流配电网拓扑结构

Fig. 1 DC distribution network diagram

2 序贯蒙特卡洛法

利用序贯蒙特卡洛法时序性的优点,可得到影响系统可靠性的实时参数,并对直流配电网进行可靠性评估和预测。

供电可靠性分析的基本思路:基于仿真所处时间,计算系统元件的故障率参数和分布式电源的输出功率;然后对元件的故障状态和故障时间进行蒙特卡洛抽样,分析每个元件故障状态的影响范围和分布式电源供电范围,计算负荷的故障率和故障时间。最后利用负荷的可靠性指标评估系统的可靠性。

抽样原理为利用抽样公式得到系统元件的工作时间和故障时间,得到所有元件在模拟时间 t 内的运行状态序列 TTF 和 TTR,如图2所示,可表述为:

$$t_{\text{TTF}} = -1/[\lambda \ln(n)] \quad (1)$$

$$t_{\text{TTR}} = -1/[\mu \ln(n)] \quad (2)$$

式中, t_{TTF} 、 t_{TTR} ——分别为元件的工作时间和故障时间; λ ——元件的故障率; μ ——元件的修复率; n ——(0, 1)内的随机数。得到系统所有元件的状态序列后,就可计算负荷和系统的可靠性指标。

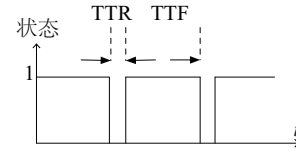


图2 元件运行和修复时间序列

Fig. 2 Components run and repair time series

3 元件可靠性评估

现阶段直流配电网供电技术的研究尚处于起步阶段^[16],建立适用于直流配电系统元件的可靠性模型是准确评估的前提。通过借鉴直流输电系统分析时的元件可靠性模型以及元件结构,针对图1中的元件建立适用于直流配电网可靠性分析的元件可靠性模型。

3.1 换流单元(AC-DC)可靠性评估

换流单元是交流电转换为直流电的关键,在可靠性评估时是不可忽略的组件。借鉴柔性直流输电系统中换流站模型^[17,18],分析采用的柔性直流换流单元结构可分为5个部分:1)交流变压器(AC);2)换流阀(V);3)直流控制与保护(C-P);4)直流一次设备(DC-E);5)其他设备(O)。其中,参考桥型多电平换流器结构,换流器采用4个换流阀并联的结构,由此得到换流单元的结构如图3所示。

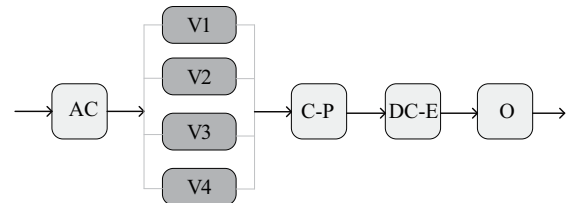


图3 换流单元结构

Fig. 3 Converter unit structure

从而可得换流单元可靠性评估如式(3)、式(4)所示:

$$\lambda_{\text{AC-DC}} = \lambda_{\text{AC}} + \lambda_{\text{V}} + \lambda_{\text{C-P}} + \lambda_{\text{DC-E}} + \lambda_{\text{O}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{V}} = \lambda_{\text{V1}} \cdot \lambda_{\text{V2}} \cdot \lambda_{\text{V3}} \cdot \lambda_{\text{V4}} \quad (4)$$

式中, λ_x ——换流单元内关键元件的故障率, x 代表各个元件名称(即 AC、V、C-P、DC-E、O)。

3.2 直流变压器(DC-DC)可靠性模型

为适应不同用户、设备的电压需求,减少线路损耗,往往会通过升、降压方式来实现电压变换,因

此直流电压变换将不可避免。而直流配网中不可能用交流系统通过电磁感应原理的方式实现电压变换的方法,只能利用基于电力电子技术的功率变换器来实现电压变换和功率传递。直流变压器的结构如图 4 所示^[19]。

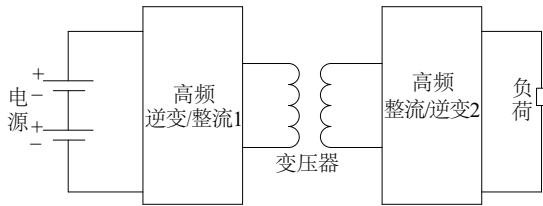


图4 直流变压器的结构

Fig. 4 DC transformer structure

由图 4 知,直流变压器可靠性模型可由逆变器(DC-AC)、变压器(T)、整流器(AC-DC)串联表示。可靠性评估为:

$$\lambda_{dc-dc} = \lambda_{DC-AC} + \lambda_T + \lambda_{AC-DC} \quad (5)$$

式中, λ_{DC-AC} 、 λ_T 、 λ_{AC-DC} ——逆变器、变压器、整流器的故障率。

3.3 分布式电源的可靠性模型

分布式电源以分布式光伏电源为背景,采用文献[20]提出的光伏电源可靠性模型进行分析。光伏发电系统由若干串联的光伏电板和逆变器并联组成,由此得知可靠性评估如式(6)、式(7)所示:

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (6)$$

$$\lambda_{pv} = \frac{\lambda_{s1} + \lambda_{s2}}{\lambda_{s1} \lambda_{s2}} \quad (7)$$

式中, λ_1 、 λ_2 ——串联的光伏电板和逆变器的故障率; λ_{s1} 、 λ_{s2} ——两个串联系统的故障率。

4 可靠性影响分析和预测

传统交流配电网可靠性分析往往忽略元件故障率、寿命以及输出功率等变化,而直流配电网中大量使用的电力电子元件寿命短、故障率高,使用传统方法可能使评估结果过于乐观。

4.1 运行方式的影响

由于负荷类型、输电类型以及电压等级等的差别,直流配电网与传统交流配电网运行方式存在明显区别。两者运行方式的区别如表 1 所示。

表 1 交直流配电网运行方式比较

Table 1 AC-DC power distribution network operating mode

项目	直流系统	交流系统
负荷类型	直流、交流	交流
输电模式	直流	交流
电压等级	750 和 1500 V	33 和 11 kV

根据直流系统运行方式的特点,系统运行时使用了大量电力电子元件(IGBT 居多),大部分元件以串联形式连接,当其中 1 个元件出现故障,系统即发生故障。由于电力电子元件运行受压力、温度、电流等因素影响较大,因此故障率会明显高于常规机械式和电磁式电力元件。本文根据故障率影响因素,提出基于时间序列的电力电子元件故障率预测模型,如式(8)所示:

$$\lambda_w = (\lambda_{OTH} \cdot \Pi_{TH} + \lambda_{OTCC} \cdot \Pi_{TCC} + \lambda_{OTCSJ} \cdot \Pi_{TCSJ} + \lambda_{ORH} \cdot \Pi_{ORH} + \lambda_{OM} \cdot \Pi_{OM}) \Pi_I \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_P \quad (8)$$

式中, λ_w ——元件故障率; λ_{OTH} ——受过热影响的基本故障率; λ_{OTCC} ——受热循环效应影响的故障率; λ_{OTCSJ} ——接点处受热循环效应影响的故障率; λ_{ORH} ——受湿度影响下的故障率; λ_{OM} ——机械过压下的故障率; Π_{TH} 、 Π_{TCC} 、 Π_{TCSJ} 、 Π_{ORH} 、 Π_{OM} ——与电、热、机械相关的影响因子(文中取值为 0.3); Π_I ——其他影响因素(文中取值为 0.1); Π_{PM} ——各部分零件的质量; Π_P ——保持系统稳定的控制技术的质量。

4.2 元件故障率的影响

相比于传统交流电网设备(如变压器、电缆等)运行稳定,直流电网电力电子元件故障率较高、寿命短,在元件寿命后期,元件的故障频率也会急剧变大,同时环境变化对元件的正常运行影响巨大。如图 5 所示为典型电力电子元件故障率曲线,元件在使用后期,故障率将急剧变高^[21]。

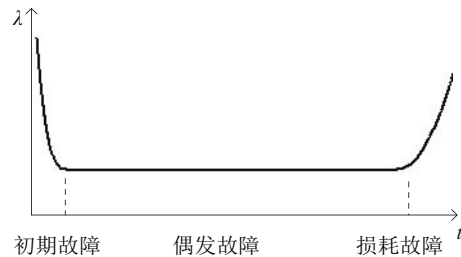


图5 典型电力电子器件故障率曲线

Fig. 5 Typical power electronic devices failure rate curve

在可靠性评估时,需要根据元件使用年限,基于时间序列进行故障率实时计算,以此达到优化评估结果的目的。实时故障率预测模型($\lambda_i(t)$)如(9)所示。

$$\lambda_i(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad (9)$$

式中, λ_i ——元件故障率; η ——长度参数; m ——形状参数。当 m 小于1时, λ 随着 t 的增大而减小(对应图中的初期故障期);当 $m=1$ 时, λ 为常数(对应图中的偶发故障期);当 m 大于1时, λ 随着 t 的增大而增大(对应图中的损耗故障期)。

式(9)仅仅是考虑了设备自身寿命引发的故障率变化。然而雷电、冰灾、台风等极端天气一旦引起设备停运,后果将会非常严重^[19]。通过引入补偿故障率 λ_0 来补偿极端天气对元件故障率的影响, λ_0 与季节、地理位置等因素有关。具体计算公式为:

$$\lambda_0 = P_w \cdot N_w + P_i \cdot N_i + P_T \cdot N_T + P_o \cdot N_o \quad (10)$$

式中, N_w 、 N_i 、 N_T 、 N_o ——每年台风、冰雪、雷电以及其他极端天气发生的次数; P_w 、 P_i 、 P_T 、 P_o ——相应天气对元件发生停运的影响因数(取我国平均值0.0500、0.0200、0.0040和0.0001)。

由此可得到修正后的初期故障期和损耗故障期的故障率预测模型变为:

$$\lambda_i(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} + \lambda_0 \quad (11)$$

4.3 分布式电源的影响

光伏、风电等分布式电源具有随机性、波动性等特性,在含有分布式电源的直流配电网可靠性评估时,分布式电源不能以恒定功率处理^[22,23]。由于光伏等分布式电源发电功率和季节、时间有关,因此在评估时需要根据有关信息基于时间序列进行实时功率预测。如图6所示为某地区夏季某日实测气温变化曲线和辐照度曲线。

根据历史气象数据及参考文献[24],本文提出考虑辐照度、温度、转换效率等影响光伏发电系统输出功率因素的功率预测模型。其中,对光伏发电系统输出功率影响最大的辐照度和环境温度实时预测模型如式(12)、式(13)所示:

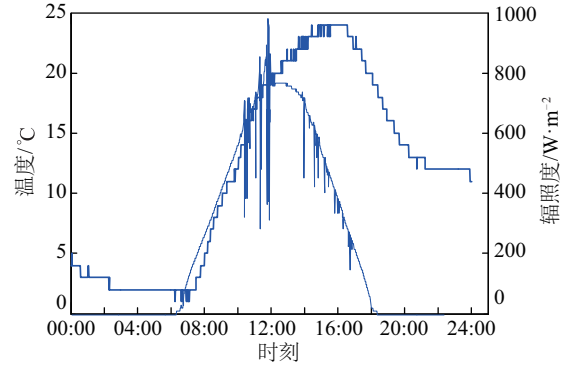


图6 环境温度和辐照强度变化曲线

Fig. 6 Ambient temperature and radiation intensity curve

$$G_T = 0.5G_d(1 + \cos\beta)(1 - A_i)(1 + [G_b/G]^{0.5} \sin^3[\beta/2]) + (G_d A_i + G_b) \cos\theta / \sin\alpha + 0.5G\rho_g(1 - \cos\beta) \quad (12)$$

$$T_{amb}(h) = T_{amb}(m) + \Delta T_{amb}(m)[0.4632 \cos(h' - 3.805) + 0.0984 \cos(2h' - 0.36) + 0.0168 \cos(3h' - 0.822) + 0.0138 \cos(4h' - 3.513)] \quad (13)$$

式中, G_d ——地表太阳光反射量; β ——光伏阵列倾斜角; A_i ——地表的光照强度与照射到地球外层的光照强度比值; G_b ——实时辐射量; G ——地表接收的总辐射量; θ ——入射角; α ——太阳高度角; ρ_g ——地表反射率; h ——每日所处时间, $h' = 2\pi(h - 1)/24$ 。

从而可得到光伏板输出总功率为:

$$P_g = P_{g,ref} (G_T/G_{T,ref}) \{1 + \beta_{voc} (T_c - T_{c,ref})\} \quad (14)$$

式中, $P_{g,ref}$ ——标准条件下系统输出总功率,即标准辐照量 $G_{T,ref} = 1000 \text{ W/m}^2$,标准温度 $T_{c,ref} = 25^\circ\text{C}$; G_T ——最大辐照量; β_{voc} ——开路时标准温度系数; T_c ——光伏电池表面经过转换后的温度, $^\circ\text{C}$ 。

式(14)中, $P_{g,ref}$ 和 T_c 的计算公式如式(15)和式(16)所示:

$$P_{g,ref} = A_{pv} G_{T,ref} \eta_{ref} \quad (15)$$

$$T_c = T_{amb} + (T_{c,NOCT} - T_{amb,NOCT})(1 - \eta_{ref}/0.9)G_T/G_{T,NOCT} \quad (16)$$

式中, A_{pv} ——光伏组件面积; η_{ref} ——标准条件下光伏组件的转换效率; T_{amb} ——实时环境温度; $T_{amb,NOCT}$ ——额定工作温度,电池额定工作温度下的 $T_{amb,NOCT} = 20^\circ\text{C}$; $G_{T,NOCT}$ ——额定辐照量, $G_{T,NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$; $T_{c,NOCT}$ ——电池额定工作温度下的太阳

电池经过转换后的温度,℃。

由于存在设备自身的损耗,光伏发电系统输出功率并不能被完全利用。参考设备功率转换性能得到功率损耗 PL 计算公式如下所示:

$$PL = PL_{\text{track}} + PL_{\text{fix}} + PL_{\text{night}} + PL_{\text{other}} \quad (17)$$

式中, PL_{track} ——光照跟踪损耗, W; PL_{fix} ——系统固定损耗, W; PL_{night} ——夜间损耗(如防冻保护), W; PL_{other} ——其余损耗, W。

从而得到光伏发电系统净输出功率为:

$$P_{\text{net}} = P_{\text{g}} - PL \quad (18)$$

分布式电源输出功率的波动直接影响供电负荷的范围变化,部分负荷有可能因功率缺额造成停运次数及停运时间增加。因此分布式电源输出功率的波动直接影响负荷可靠性指标及系统可靠性水平,负荷点 i 故障率为:

$$\lambda_i = \rho_i \lambda_1 + (1 - \rho_i)(\lambda_0 + \lambda_1) \quad (19)$$

式中, λ_1 、 λ_0 ——光伏发电供电区域内、外的故障率; ρ_i ——分布式电源对该点的可用率,计算公式为:

$$\rho_i = \begin{cases} (P_{\text{net}} - P_{\text{load},i}) / P_{\text{load},i} & \left(P_{\text{net}} - \sum_{i=1}^n P_{\text{load},i} \right) < P_{\text{load},i} \\ 1 & \left(P_{\text{net}} - \sum_{i=1}^n P_{\text{load},i} \right) > P_{\text{load},i} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\sum_{i=1}^n P_{\text{load},i}$ ——区内 i 个负荷的总消耗功率, W; $P_{\text{load},i}$ ——第 i 个负荷的消耗功率, W。

4.4 结果校正

可靠性参数校正的实质是对评估结果的校正,即对利用现有模型分析得到的数据进行校正,使其符合历史可靠性数据。校正时,首先是利用算法计算系统可靠性指标;然后再比较上一年元件理论故障率与实测故障率,用校正模型对本年系统可靠性指标预测值进行校正,以达到实现精确评估系统可靠性的目的。可靠性指标(以系统平均停运时间 SAIDI 为例)和校正模型为:

$$SAIDI_t = \frac{\sum U_j N_j}{\sum \lambda_j N_j} \quad (21)$$

$$SAIDI_t' = \frac{\partial SAIDI_t}{\partial MTTR} \Delta MTTR + SAIDI_t \quad (22)$$

式中, U_j ——负荷点 j 的年平均停运时间; N_j ——负荷点 j 的用户数; λ_j ——负荷点 j 的故障率;

$MTTR$ ——元件平均修复时间, $SAIDI$ 为系统停电时间。其中,负荷点 j 的故障率(λ_j)和年平均停运时间(U_j)计算如式(23)所示:

$$\begin{cases} \lambda_j = \sum_{m=1}^N \lambda_m \\ U_j = \sum_{m=1}^N \lambda_m r_m \end{cases} \quad (23)$$

式中, λ_m ——第 m 个元件的故障率,其取值主要为 $\lambda_{\text{AC-DC}}$ 、 $\lambda_{\text{DC-DC}}$ 、 λ_{PV} 、 λ_w 和 λ_i ; r_m ——第 m 个元件的平均故障修复时间。

5 计算流程

分析时利用广度优先搜索法对系统节点进行编号,可靠性评估使用序贯蒙特卡洛法^[19]进行分析。

评估时,需要根据仿真所处时间,基于时间序列,利用式(8)~式(20)进行可靠性参数的实时计算,并利用式(21)~式(23)对计算得到的系统可靠性结果进行校正。具体流程如图7所示。

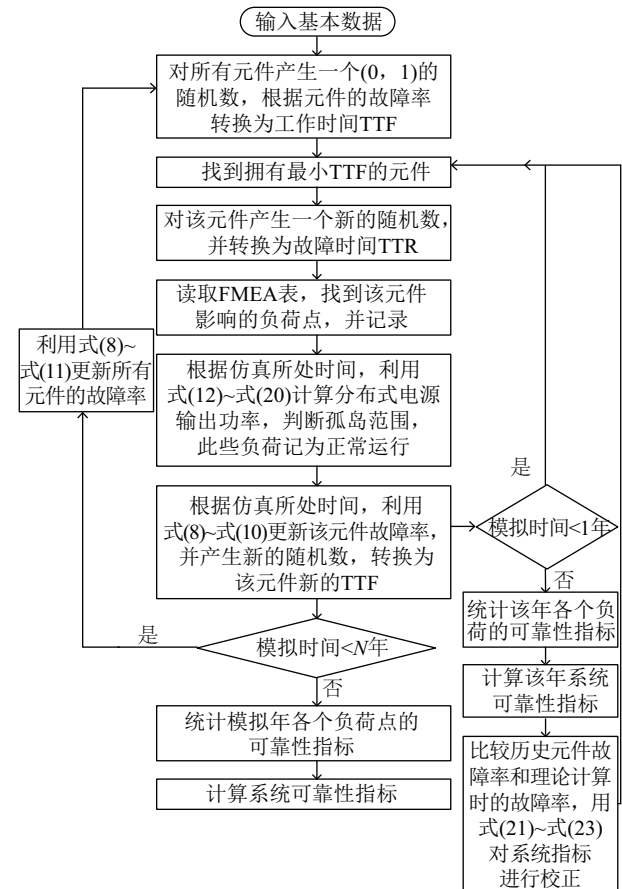


图7 可靠性计算流程图

Fig. 7 Flow chart for reliability calculation

6 算例分析

算例分析采用文献[25]所示的13馈线测试系统。系统包括1个换流单元、13条馈线、电缆长度为320 km、线路长度为100 km、11881个保护及辅助元件、530个直流变压器、2000个分布式电源(单个电源输出功率最大值为10 kVA)和20000户用户(其峰值功率为80 MVA)。

直流元件的可靠性参数参考国家电网公司直流输电项目的历年统计值^[26]。直流配电网主要元件寿命为IGBT元件平均寿命10 a、逆变器平均寿命17 a、太阳能电池平均寿命15 a。分析结果以系统平均停电时间(SAIDI)为指标,如图8空间显示。

如图8和图9所示,通过对有接地系统的直流配电网可靠性结果校正前后对比可知,校正模型对某些区域的评估结果SAIDI(图中方框内数据为例)进行了修正,校正后的评估结果与历史数据更加吻合,表明使用常规评估方法得到的结果较本文的评估方法较差,采用的校正模型对可靠性评估具有积极作用,究其原因利用序贯蒙特卡洛法得到的理论结果与工程结果存在差异。

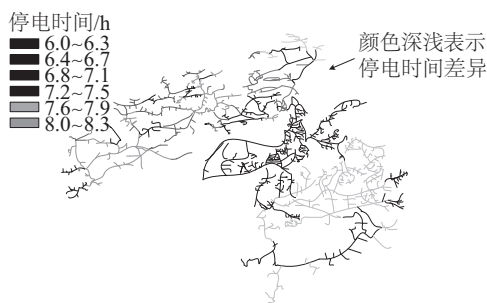


图8 SAIDI空间可靠性结果(校正前、有接地系统)

Fig. 8 SAIDI reliability of the results of space

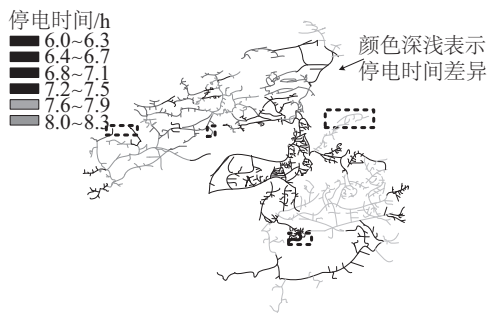


图9 SAIDI空间可靠性结果(校正后、有接地系统)

Fig. 9 SAIDI reliability of the results of space

如图9和图10所示,通过对有、无接地系统的

直流配电网可靠性结果比较可知,在无接地系统的直流配电网中,SAIDI的评估结果偏高(图中方框内数据为例,部分区域停电时间增加了约1 h),分析表明无接地系统可靠性相对有接地系统的直流配电网较差,某一单极线路故障时,接地系统可与另一单极线路组成回路,对提高直流配电网的可靠性有积极效果。因此本文采用接入接地系统的直流配电网结构相对可靠,故障几率相对较小。同时利用空间可靠性的空间特性,能够形象、直观地表现直流配电网可靠性水平。

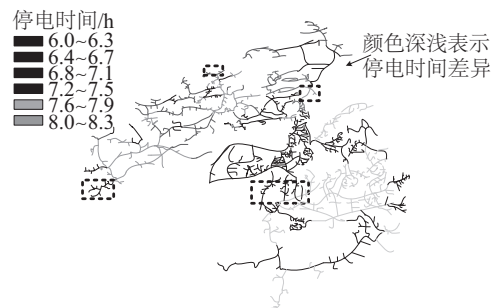


图10 SAIDI空间可靠性结果(校正后、无接地系统)

Fig. 10 SAIDI reliability of the results of space

利用时间序列对电力电子元件故障率等抽样,并对直流配电网可靠性预测分析,结果见图11,由图中的节点SAIDI(即在当前节点内的微型系统SAIDI指标)可知,馈线处的节点可靠性相对较高,在分支处节点的可靠性相对较低(馈线处的SAIDI在约6.5 h,而分支处最大接近9 h),主要原因是分支处负荷的正常运行受馈线能否正常运行的制约,分布式电源输出功率尚未满足分支处负荷需求,即分布式电源的供电支撑能力不足;比较有、无接地系统的节点SAIDI可知,在有接地系统的直流系统

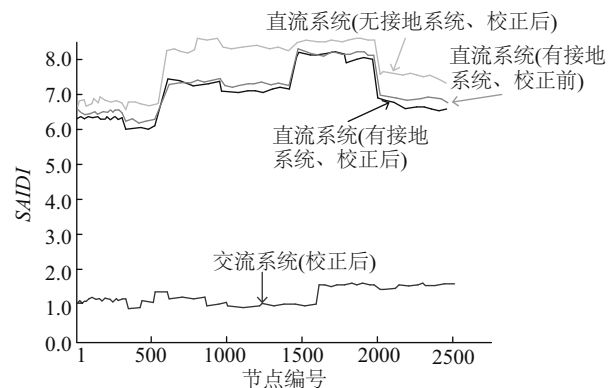


图11 节点的SAIDI

Fig. 11 SAIDI of nodes

分支处的节点 SAIDI 明显减小(最大减小量在 1 h 以上),即有接地系统的直流系统可靠性较高,主要原因是接地系统有效提高了系统对分支处负荷的正常供电能力。

由图 12 的 SAIDI 预测结果可知,直流配电网的可靠性指标(SAIDI)与交流配电网的结果相比明显较高(最大相差 6 h 以上)。主要原因是直流系统大量使用了高故障率的电力电子器件,导致系统停运次数变大,可靠性降低。由此可推断电力电子元件是限制直流配电网发展的主因。同时,在相同仿真年限里,直流系统的 SAIDI 存在明显减小过程(如图 12 虚线 2017~2018 年部分所示),而交流系统的 SAIDI 曲线在逐步上升,究其原因是在直流系统元件的寿命较短,更换频率大,导致在一定时期内,系统的可靠性存在明显波动。

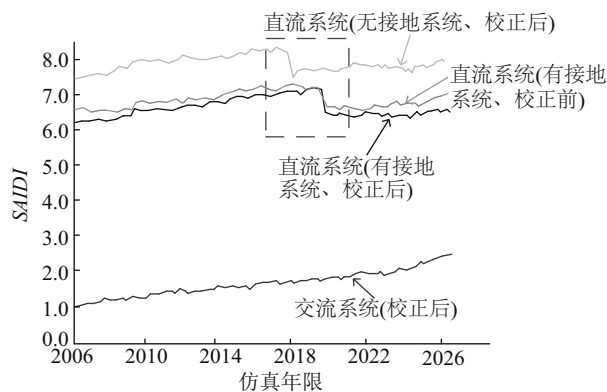


图 12 SAIDI 预测结果

Fig. 12 SAIDI forecast results

7 结 论

论文基于序贯蒙特卡洛法,提出直流配电网的可靠性评估与预测方法,得到以下结论:

1)该方法考虑了直流配电网运行方式、元件故障率、光伏电源输出功率变化等因素对系统可靠性的影响,评估与预测直流配电网可靠性的功能,可靠性高,适应性强。

2)在目前技术条件下,仿真算例中电力电子元件的故障率高,直流配电网可靠性相对交流配电网有降低的可能,是影响直流配电网可靠性的关键因素。

3)双极运行方式与接地系统配合,具有正极接地供电、负极接地供电、两极供电的运行方式,在系统发生故障后系统运行的灵活性得到大幅提升,可

提高直流供电网络的可靠性。

4)通过预测分析可知,直流配电网可靠性在元件寿命后期存在波动,可通过可靠性预测值分析提前发现问题并告知运行人员,这对系统的规划和运行都具有重要的理论和现实意义。

[参考文献]

- [1] 宋 强, 赵 彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9—13.
- [1] Song Qiang, Zhao Biao, Liu Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9—13.
- [2] 胡竞竞, 徐习东, 裴 鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 844—850.
- [2] Hu Jingjing, Xu Xidong, Qiu Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844—850.
- [3] 雍 静, 徐 欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42—52.
- [3] Yong Jing, Xu Xin, Zeng Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42—52.
- [4] 薛士敏, 陈超超, 金 毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114—3118.
- [4] Xue Shimin, Chen Chaochao, Jin Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114—3118.
- [5] Prabhala V A K, Baddipadiga B P, Ferdowsi M. DC distribution systems—An overview[A]. 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications[C], Milwaukee, USA, 2014, 307—313.
- [6] Agustoni A, Borioli E, Brenna M, et al. LV DC distribution network with distributed energy resources: analysis of possible structures[A]. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution[C], Turin, Italy: IEEE, 2005, 1—5.
- [7] Du Yi, Jiang Daozhuo, Yin Rui, et al. Modeling and simulation of distribution network based on distributed energy[A]. 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)[C], Toronto ON, Canada,

- 2013, 990—995.
- [8] Zahedi B, Norum L E. Modelling, analysis and control of an isolated boost converter for system level studies [A]. Aegean conference on Electric Machines and Power Electronics[C], Istanbul, Turkey, 2011.
- [9] 王森, 刘勇. 直流配电网及其在舰船区域配电的应用[J]. 船电技术, 2014, 34(11): 77—81.
- [9] Wang Sen, Liu Yong. DC power distribution network and its applications to zonal power distribution of warships[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2014, 34(11): 77—81.
- [10] 齐曙光. 通信机房新型供电模式可靠性与节能性分析[J]. 现代电信科技, 2012, 10(10): 6—11.
- [10] Qi Shuguang. A new mode of power supply reliability and energy saving analysis of the telecom room [J]. Modern Science & Technology of Telecommunication, 2012, 10(10): 6—11.
- [11] Chwa J, Ameri A, Mozumdar M. Improving reliability of aircraft electric power distribution system [A]. IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC) [C], Long Beach, CA, USA, 2014, DOI: 10.1109/IGESC.2014.7018641.
- [12] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98—103.
- [12] Jiang Daozhuo, Zheng Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98—103.
- [13] Seo Gab-Su, Baek J, Choi Kyu-Sik, et al. Modeling and analysis of DC distribution systems[A]. 8th International Conference on Power Electronics- ECCE Asia [C], Jeju, South Korea, 2011, DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944589.
- [14] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62—67.
- [14] Zhou Fengquan, Huang Wei. Study on the key technology of DC distribution power network [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62—67.
- [15] 康青, 马晓春, 叶卫华, 等. 直流配电网关键技术及展望[J]. 电气自动化, 2014, 36(1): 5—9.
- [15] Kang Qing, Ma Xiaochun, Ye Weihua, et al. Key technology of DC distribution network and its prospect [J]. Electrical Automation, 2014, 36(1): 5—9.
- [16] 胡子珩, 马骏超, 曾嘉思, 等. 柔性直流配电网在深圳电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 44—47.
- [16] Hu Ziheng, Ma Junchao, Zeng Jiasi, et al. Research on application of flexible DC power distribution system in shenzhen power grid [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 44—47.
- [17] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2681—2689.
- [17] Zeng Qingyu. Analysis on reliability of UHVAC and UHVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2681—2689.
- [18] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582—2590.
- [18] Zeng Jiasi, Xu Xidong, Zhao Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582—2590.
- [19] 王子龙, 肖岚, 赵鹏. 全桥直流变压器/变换器 ISOP 组合式系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5819—5826.
- [19] Wang ZiLong, Xiao Lan, Zhao Peng. Researches on combined input-series output-parallel systems composed of full-bridge DC transformers and converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5819—5826.
- [20] 李国庆, 于海承, 李奇, 等. 地方供电网可靠性评估[J]. 东北电力大学学报, 2006, 26(2): 1—4.
- [20] Li Guoqing, Yu Haicheng, Li Qi, et al. Local supply network reliability assessment [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2006, 26(2): 1—4.
- [21] Rei A M, Schilling M T. Reliability assessment of the Brazilian power system using enumeration and Monte Carlo [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1480—1487.
- [22] Moharil R M, Kulkarni P S. Reliability analysis of solar photovoltaic system using hourly mean solar radiation data [J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 691—702.
- [23] Vallée F, Lobry J, Deblecker O. System reliability assessment method for wind power integration [J]. IEEE Transactions on Power System, 2008, 23(3): 1288—1298.
- [24] Gafurov T, Usaola J, Prodanovic M. Modelling of concentrating solar power plant for power system reliability studies [J]. IET Renew Power Generation, 2015, 9(2): 120—130.
- [25] Ross D P, Freeman L A A, Brown R E. Overcoming data problems in predictive reliability distribution modeling [A]. Transmission and Distribution Conference

- and Exposition, IEEE/PES 2001 [C], Atlanta, GA, 2001, DOI: 10.1109/TDC.2001.971330.
- [26] 梁志峰, 董 昱, 张智刚. 2006—2012 年国家电网公司直流输电系统强迫停运统计分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 1—5.
- [26] Liang Zhifeng, Dong Yu, Zhang Zhigang. Statistical analysis on forced outages of HVDC transmission systems in state grid corporation of China from 2006 to 2012[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 1—5.

DC DISTRIBUTION NETWORKS RELIABILITY EVALUATION AND PREDICTION BASED ON SEQUENTIAL MONTE CARLO METHOD

Li Jiang¹, Liu Weibo¹, Li Guoqing¹, Zhi Xin², Ouyang Bin², Chen Xiangyan²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Jiangxi Power Company Ganxi Power Supply Branch, Xinyu 338025, China)

Abstract: This paper analyzes the affecting mechanism of system operation, device lifetime, distributed output power and other aspects on the reliability of the power grid in bipolar operation grounding system plus DC power distribution networks. By the correction model, sequential Monte Carlo method is used to achieve DC distribution network reliability assessment and correction. Spatial profile of reliability prediction value that based on simulation data and historical data are demonstrated in 13-feeder case. Meanwhile, this paper uses sequential Monte Carlo method to predict reliability for the next 10 years by using the correction model and the failure rate prediction parameter. The effectiveness of the proposed method is demonstrated at the end of paper.

Keywords: DC distribution network; operation mode; component lifetime; reliability prediction model; sequential Monte Carlo method