分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系

王 震1,鲁宗相1,段晓波2,李晓明2

(1. 电力系统国家重点实验室,清华大学电机系,北京市 100084; 2. 河北省电力研究院,河北省石家庄市 050021)

摘要:近年来光伏发电逐渐受到广泛的关注,光资源的波动性和间歇性特性使得准确评估其可靠性十分重要。文中分析了分布式光伏发电系统的结构以及出力特点,以此为基础建立了综合考虑能源约束和系统结构特点的六状态可靠性模型,并从时间、出力、系统这3个层面建立了综合评价系统可靠性的指标体系。最后,采用实际系统算例进行了计算分析,验证了所提出方法的合理性和可行性。结果表明,该模型及指标体系能够全面反映分布式光伏发电系统的运行特点、出力水平和故障情况,以及实际运行可靠性。

关键词:分布式电源;光伏发电;可靠性模型;指标体系;可再生能源

0 引言

近年来,随着化石能源日益枯竭,可再生能源逐渐受到广泛的关注。太阳能作为一种清洁能源发展迅速,相应的各方面应用研究也逐渐开展起来[1-2]。由于光资源的间歇性和波动性,光伏发电接入后将给电力系统带来更多的不确定因素,因此准确评估其可靠性十分重要。

光伏发电系统的可靠性分析,国内外已有一些 研究。文献[3]提出了一种含光伏系统的电力系统 可靠性分析方法,在考虑光伏系统的多状态模型情 况下用卷积方法构造有效负载持续时间曲线,并且 提出了利用历史太阳辐射数据构造辐射概率分布函 数的方法,给出了应用算例。文献「47给出了光伏发 电系统的标准术语,提出了基本的时间指标以及可 靠性指标体系。文献[5]提出了一种光伏系统的马 尔可夫模型,并建立了全寿命周期模型以进行经济 性评估。文献「6]描述了一种主要基于部件的故障 以及系统的可靠性结构图的大型光伏发电系统的可 靠性和可用性综合评估方法。文献「7]提出了一个 考虑天气影响的光伏发电系统的三状态可靠性模 型,给出了一种评估含分布式光伏系统的配电网系 统的可靠性方法。文献[8]提出了一种考虑新能源 不确定性的新可靠性指标——有效安装备用率。

然而,文献[3,7-8]考虑了能源输入的影响,但 没有考虑系统故障的影响;文献[4]给出了基础性的 定义和术语,但缺少对系统特点的详细分析,缺少与 具体的模型的结合;文献[5-6]考虑了系统的结构模 型与故障情况,但并未对一般的光伏发电系统给出 通用的故障分析方法,同时缺少对太阳能不确定性的考虑。总体而言,目前国内外已有研究侧重分析 光资源波动性对可靠性的影响,缺少综合考虑光资 源波动和光伏发电系统结构特点的可靠性模型,也 缺乏相应的评估指标。

本文在国内外已有研究基础上,首先详细分析 了输入光资源约束和光伏发电系统的结构特点,给 出了结构模型故障的计算方法,继而提出针对分布 式光伏发电系统的多状态可靠性模型,定义相应的 可靠性指标体系,最后用实际系统算例验证了模型 和指标体系的正确性和实用性。

1 分布式光伏发电系统的特点分析

分布式光伏发电系统的出力状态与光资源的变 化密切相关,而系统故障状态还与部件可靠性水平 和系统结构特点有关。为此,从以下2个方面来讨 论分布式光伏发电系统的出力状态特性。

1.1 系统出力特点分析

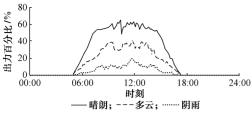
1)时间季节的影响

光伏发电系统理想情况下的日出力,随着太阳辐射的变化呈现先增后减的特点,中午时达到峰值。晴朗天气时,正午出力最大值可以达到装机容量的60%~90%[9-12]。

2)不同天气情况的影响

不同的天气情况也会对光伏发电系统的出力造成影响,如阴雨、多云或者沙尘暴等天气条件下,光伏发电系统的出力会急剧下降。这给光伏发电系统的出力带来了很大的不确定性。

图 1 中给出了晴朗、多云、阴雨这 3 种天气情况下的光伏发电系统出力占额定出力的百分比曲线[10]。

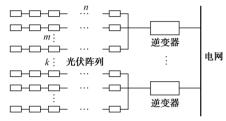


不同天气下的光伏发电系统的出力百分比曲线 Fig. 1 Output percentage of photovoltaic power generation system under different weather conditions

可见,天气状况对系统出力的影响很大,光资源 成为其出力的重要约束条件。因此,本文按照资源 充裕度的情况将系统状态分为全额、资源限制减额 以及夜间停运这3种状态。

1.2 系统结构特点分析

分布式光伏发电系统的典型结构可由图 2 简单 描述。



典型分布式光伏发电系统的基本构架 Basic structure of distributed photovoltaic power generation system

系统主要由光伏阵列和并网逆变器组成。光伏 阵列中,n块光伏电池板串联成一串,m 串光伏电池 板并联接入一台逆变器,共有 k 台逆变器并联接入 电网。根据这种结构特点,可知单块光伏电池板的 故障仅会引起其所在光伏电池板串的停运,而逆变 器的故障会导致其所在光伏-逆变器组停运。按照 不同的故障情况可将系统状态分为全额运行、故障 减额运行以及故障停运这3种状态。下面结合图2 的典型结构对系统结构故障情况进行分析。

设光伏电池板和逆变器的故障率分别为λ,和 λ_2 ,故障修复时间分别为 r_1 和 r_2 ,故障概率分别为 $U_1 = \lambda_1 r_1$ 和 $U_2 = \lambda_2 r_2$ 。根据串并联系统可靠性计 算公式[13],可得 n 块光伏电池板串联后的故障率 λ_{1S} 、故障修复时间 r_{1S} 、故障概率 U_{1S} 分别为:

$$\lambda_{1S} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = n\lambda_1 \tag{1}$$

$$r_{1S} = \frac{1}{\lambda_{1S}} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} r_{i} = r_{1}$$
 (2)

$$U_{1S} = \lambda_{1S} r_{1S} = nU_1 \tag{3}$$

m 串光伏电池板并联后的故障率λ_{ISU}、故障修 复时间 r_{1SU} 、故障概率 U_{1SU} 分别为:

$$\lambda_{1SU} = \lambda_{1S}^m m r_{1S}^{m-1} \tag{4}$$

$$r_{1SU} = \frac{r_{1S}}{m} \tag{5}$$

$$U_{1SU} = \lambda_{1SU} r_{1SU} = U_{1S}^m \tag{6}$$

与逆变器串联后,得到光伏-逆变器组的故障 率 λ_{PI} 、故障修复时间 r_{PI} 、故障概率 U_{PI} 分别为:

$$\lambda_{PI} = \lambda_{1SU} + \lambda_2 \tag{7}$$

$$r_{\rm PI} = \frac{\lambda_{\rm 1SU} r_{\rm 1SU} + \lambda_2 r_2}{\lambda_{\rm PI}} \tag{8}$$

$$U_{\rm PI} = \lambda_{\rm PI} r_{\rm PI} = U_{\rm 1SU} + U_{\rm 2} \tag{9}$$

1.2.1 系统完全故障

基于以上的分析计算,k组光伏-逆变器组并联 系统完全故障的故障率 λ_T 、故障修复时间 r_T 、故障 概率 U_{T} 可按如下公式计算:

$$\lambda_{\mathrm{T}} = \lambda_{\mathrm{PI}}^{k} k r_{\mathrm{PI}}^{k-1} \tag{10}$$

$$r_{\rm T} = \frac{r_{\rm PI}}{k} \tag{11}$$

$$U_{\mathrm{T}} = \lambda_{\mathrm{T}} r_{\mathrm{T}} = U_{\mathrm{PI}}^{k} \tag{12}$$

1.2.2 系统部分故障

当光伏阵列由较多光伏-逆变器组组成时,完 全故障发生的概率并不大,更多的是部分故障。故 障原因可能是光伏电池板串的故障或者逆变器故 障。

1)部分光伏电池板串故障

可以按照退出运行的光伏电池板串数量分为 1 阶, 2 阶, \dots , mk-1 阶部分故障的状态, i 阶部分 故障时,由于各个光伏电池板串间相互独立,其故障 概率 U_{1P} 可按下式计算:

$$U_{1Pi} = C_{mk}^{i} U_{1S}^{i} (1 - U_{1S})^{mk-i}$$
 (13)

i 串相同的光伏电池板并联,故障修复时间为:

$$r_{1Pi} = \frac{r_{1S}}{i} \tag{14}$$

故障率 λ_{1Pi}可由式(13)和式(14)推出:

$$\lambda_{1Pi} = \frac{U_{1Pi}}{r_{1Pi}}$$
 $i = 1, 2, \dots, mk - 1$ (15)

2)部分逆变器故障

类似光伏电池板串故障的分析,可得部分逆变 器故障概率 U_{2Pi} 、故障修复时间 r_{2Pi} 、故障率 λ_{1Pi} 计算 公式如下:

$$U_{2Pi} = C_k^i U_2^i (1 - U_2)^{k-i}$$
 (16)

$$r_{2\mathrm{P}i} = \frac{r_2}{i} \tag{17}$$

$$r_{2\text{P}i} = \frac{r_2}{i}$$
 (17)
$$\lambda_{2\text{P}i} = \frac{U_{2\text{P}i}}{r_{2\text{P}i}} \qquad i = 1, 2, \dots, k - 1$$
 (18)

由于光伏电池板串和逆变器的各阶故障相对独 立,系统部分故障的故障率 λ_P 、故障修复时间 r_P 、故 障概率 U_P 可按如下公式计算:

$$\lambda_{P} = \sum_{i=1}^{mk-1} \lambda_{1Pi} + \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_{2Pj}$$
 (19)

$$r_{\rm P} = \frac{U_{\rm P}}{\lambda_{\rm P}} \tag{20}$$

$$U_{\rm P} = \sum_{i=1}^{mk-1} U_{1\rm P}_i + \sum_{i=1}^{k-1} U_{2\rm P}_j \tag{21}$$

综上分析,由于受到光资源约束以及系统结构 特点的影响,光伏系统的出力状态与常规电源不同, 并不是恒定单一的,必须综合考虑资源特点与系统 故障特点建立多状态可靠性模型。

2 系统的状态分析与可靠性模型建立

2.1 可用性状态的划分

文献[4]分析了系统的可用性状态,综合考虑了各种因素的影响,将光伏发电系统的状态作了如图 3 所示的划分。

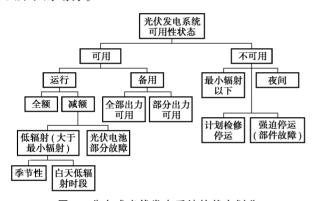


图 3 分布式光伏发电系统的状态划分 Fig. 3 States division of distributed photovoltaic power generation system

光伏发电系统的状态可分为可用和不可用。

- 1)可用状态分为运行和备用 2 种情况。①运行状态根据出力的大小,可以分为全额和减额 2 种状态。减额状态分为低辐射引起或由部分光伏电池组件故障单独退出运行引起。②系统处于备用状态时,分为全部出力可用和部分出力可用 2 种状态。
- 2)不可用状态可分为资源不可用和设备不可用 2 种情况。①资源不可用为夜间状态或系统不可 用。②设备不可用为光伏发电系统发生部件的强迫 停运或者计划检修停运。

以上的可用状态划分定义了光伏发电系统的基本状态,但对运行状态并未给出具体的划分和定义,本文结合第1节中资源、结构特点分析,对分布式光伏发电系统的可靠性状态进一步作出明确划分。

2.2 可靠性状态的划分

本文对分布式光伏发电系统的可靠性状态划分如图 4 所示。其中,详细划分定义 3 个新的状态:资

源限制减额运行、故障减额运行以及资源限制下故障减额运行状态。

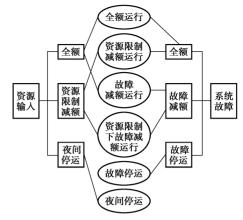


图 4 分布式光伏发电系统的可靠性状态划分 Fig. 4 Reliability states division of distributed photovoltaic power generation system

对图中划分的6个状态分别定义如下。

- 1)全额运行状态:天气晴朗的午间,太阳辐射较强烈,系统的出力状态处于较高水平,可以达到装机容量的60%~90%。将此类系统的运行状态归为全额运行状态,以装机容量的60%作为划定标准。
- 2)资源限制减额运行状态:受天气等因素的影响,将太阳辐射较低、出力水平低于 60%装机容量的系统状态都归为资源限制减额运行状态。
- 3)故障减额运行状态:由于部分设备故障单独 退出运行造成系统部分出力损失状态,此时系统的 资源情况并不受限制。
- 4)资源限制下故障减额运行状态:系统同时受到资源限制以及部分设备故障影响造成系统部分出力损失的状态。
- 5)故障停运状态:系统发生强迫停运或计划性 检修停运造成系统全部出力损失的状态。
- 6)夜间停运状态:系统由于夜间无辐射或辐射 过低而处于停运的状态。

2.3 可靠件模型

根据系统的可靠性状态划分,可以得到六状态 可靠性模型。其状态转移如图 5 所示。

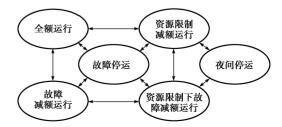


图 5 分布式光伏发电系统六状态转移图 Fig. 5 Six-state transition diagram of distributed photovoltaic power generation system

用 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 , P_6 表示系统处在 6 个不同状态的概率, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 表示系统处在 6 个不同状态的时间,则

$$P_i = \frac{T_i}{T}$$
 $i = 1, 2, \dots, 6$ (22)

式中:T为统计时间,通常为8760h。

3 可靠性指标体系

文献[4]中从时间、出力、可靠性等多方面定义了光伏发电系统的可靠性指标,但是未建立指标与可靠性模型之间的对应关系。针对 2.3 节中建立的可靠性状态模型,本文分别从时间、出力、系统总体等方面对应定义分布式光伏发电系统可靠性指标以反映系统各个状态的特性,进而综合反映系统特性。

3.1 时间指标

文献[4]中提出了一种光伏发电系统时间指标体系的划分方法,提出了全额运行时间、减额运行时间等指标,参照该划分思路,结合本文 2.2 节中定义的 6 个状态,将时间指标进行如图 6 所示的划分。



图 6 分布式光伏发电系统时间指标体系 Fig. 6 Time indices of distributed photovoltaic power generation system

结合 2.2 节中系统状态,定义状态时间指标如下。

- 1)全额运行时间 T_{FR} :系统处于全额运行状态的累积时间。
- 2)资源限制减额运行时间 T_{RP} : 系统仅由于资源限制处于减额运行状态的累积时间。
- 3)故障减额运行时间 T_{FP} : 系统仅由于故障处于减额运行状态的累积时间。
- 4)资源限制下故障减额运行时间 T_{RFP} : 系统由资源限制、故障同时造成减额运行状态的累积时间。
- 5)故障停运时间 T_A :系统发生完全故障造成停运的累积时间。根据 1.2 节中的分析, T_A 可按下式计算:

$$T_{\rm A} = TU_{\rm T} \tag{23}$$

6)夜晚停运时间 T_N :系统处在夜间停运的累积时间。

定义各积累状态时间指标如下。

- 1)故障引起减额运行时间 T_{FCP} : $T_{FCP} = T_{FP} + T_{RFP}$,根据 1. 2 节中的分析, T_{FCP} 可以按 $T_{FCP} = TU_P$ 计算。
- 2) 资源引起的减额运行时间 T_{RCP} : $T_{\text{RCP}} = T_{\text{RP}} + T_{\text{RFP}}$ 。
- 3)减额运行时间 T_P :系统处于减额运行状态的 累积时间, $T_P = T_{RP} + T_{FP} + T_{RFP}$ 。
- 4)运行时间 T_R :系统处于运行状态的累积时间, $T_R = T_{FR} + T_P$ 。
- 5)停运时间 T_0 : 系统处于停运状态的累积时间, $T_0 = T_A + T_N$ 。
- 6)等效运行时间 T_{RE} :将运行时间折合成装机容量下的运行时间,

$$T_{RE} = \frac{ST}{S_E} \tag{24}$$

式中:S 为系统等效出力值; S_E 为装机容量。

3.2 出力状态指标

- 1)全额等效出力 S_{FR} : 系统在全额运行状态下的等效出力。
- 2)资源限制减额等效出力 S_{RP} : 系统在资源限制减额运行状态下的等效出力。
- 3)故障减额等效出力 S_{FP} : 系统在故障减额运行状态下的等效出力。
- 4)资源限制下故障减额等效出力 S_{RFP} : 系统在资源限制下故障减额运行状态下的等效出力。
- 5)等效减额出力 S_P : 系统处于减额运行状态的等效出力。
 - 6)等效出力 S:系统统计时间内等效恒定出力。
- 7)等效出力系数 $D_{\rm E}$:实际发电中等效出力与额 定出力的比值 $D_{\rm E} = S/S_{\rm E}$ 。
 - 8)最大出力 S_{M} :系统实际发电中的最大出力。
- 9)最大出力系数 D_{M} :实际发电中最大出力与 额定出力的比值 $D_{\text{M}} = S_{\text{M}}/S_{\text{E}}$ 。

3.3 系统总体指标

为反映系统故障情况,定义故障指标如下。

- 1)故障率 λτ:系统一年内发生完全故障次数。
- 2)故障平均修复时间 r_T :完全故障的平均修复时间。
- 3)设计可用率 A_d :根据系统故障率和修复时间 计算出的设计上的系统可用率, $A_d=1-\lambda_T r_T$ 。

为反映系统实际运行状况,定义运行指标如下。

- 1)实际可用率 A_a : 光伏发电系统实际处于运行状态的概率, $A_a = T_R/T$ 。
- 2)全额运行率 R_{FR} : 光伏发电系统实际处于全额运行的概率, $R_{FR} = T_{FR}/T$ 。
 - 3)资源限制减额运行率 R_{RCP}: 光伏发电系统实

际中由于资源限制导致减额运行状态的概率, $R_{RCP} = T_{RCP}/T$ 。

- 4)设备故障减额运行率 R_{FCP} : 光伏发电系统实际处于系统故障导致减额运行状态的概率, $R_{FCP}=T_{FCP}/T$ 。
- 5)能源利用效率 E: 光伏发电系统利用太阳能的效率,可以等效运行时间与运行时间之比描述, $E=T_{\rm RE}/T_{\rm R}$ 。

4 算例

本文采用小型光伏发电系统作为算例验证本文提出的可靠性模型与指标体系的可行性与合理性。系统总装机容量为 5.52 kW,8 块 230 Wp 的光伏电池板构成一串,接入一台逆变器,共有 3 组光伏-逆变器组。

算例系统部件故障数据采用文献[5]的统计数据,实际出力曲线根据保定实地数据(2008年10月18日到2009年10月17日)得到,分别在表1和图7中给出。

表 1 光伏发电系统各部件故障参数

Tab. 1 Failure parameters for components of photovoltaic power generation system

部件	故障率/ (次・a ⁻¹)	故障修复时间/ (a·次 ⁻¹)	故障概率
光伏电池板	0.289	0.028 7	0.008 3
逆变器	2.978	0.027 4	0.081 5

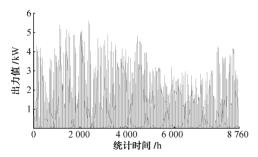


图 7 小型光伏发电系统实际小时出力数据统计曲线 Fig. 7 Output curve of an actual small photovoltaic power generation system

4.1 系统故障分析

分析系统故障情况,结合 1.2 节中的分析与系统的结构特点,n=8,m=1,k=3,根据式(1)~式(9),光伏-逆变器组的故障参数具体计算如下:

$$\lambda_{\mathrm{PI}} = \lambda_{1\mathrm{SU}} + \lambda_{2} = 5.29$$
 次 /a $r_{\mathrm{PI}} = \frac{\lambda_{1\mathrm{SU}} r_{1\mathrm{SU}} + \lambda_{2} r_{2}}{\lambda_{\mathrm{PI}}} = 0.028$ a/ 次 $U_{\mathrm{PI}} = U_{1\mathrm{SU}} + U_{2} = 0.148$ 1 当系统完全故障时:

$$\lambda_{\rm T} = 3\lambda_{\rm Pl}^3 r_{\rm Pl}^2 = 0.347$$
 次 /a
$$r_{\rm T} = \frac{r_{\rm Pl}}{3} = 0.0093 \text{ a/ 次}$$

$$U_{\rm T} = U_{\rm Pl}^3 = 0.0032$$

若统计时间 T 取 8 760 h,由式(23)可计算故障 停运时间 $T_{\rm A} = TU_{\rm T} \approx$ 28 h。

当系统部分故障时,由于 m=1,k=3,可将系统的部分故障分为 1 阶和 2 阶,其故障参数计算如下:

$$U_{\text{Pl}} = C_3^1 U_{\text{Pl}} (1 - U_{\text{Pl}})^2 = 0.3224$$
 $r_{\text{Pl}} = r_{\text{Pl}} = 0.028 \text{ a/ 次}$
 $\lambda_{\text{Pl}} = \frac{U_{\text{Pl}}}{r_{\text{Pl}}} = 11.51 \text{ 次 /a}$
 $U_{\text{P2}} = C_3^2 U_{\text{Pl}}^2 (1 - U_{\text{Pl}}) = 0.0561$
 $r_{\text{P2}} = \frac{U_{\text{Pl}}}{2} = 0.014 \text{ a/ 次}$
 $\lambda_{\text{P2}} = \frac{U_{\text{P2}}}{r_{\text{P2}}} = 4.0071 \text{ 次 /a}$

则可得系统部分故障参数如下:

$$\lambda_{P} = \lambda_{P1} + \lambda_{P2} = 15.517 1$$
次 /a
$$r_{P} = \frac{U_{P}}{\lambda_{P}} = 0.024 4 \text{ a} / \text{ 次}$$

$$U_{P} = U_{P1} + U_{P2} = 0.378 5$$

由 $T_{FCP} = TU_P$ 可计算故障引起减额运行时间约为 3 316 h。

根据以上分析还可以计算故障减额下的出力与 正常状态出力的比值 kp:

$$k_{\rm P} = \frac{2}{3} \frac{U_{\rm Pl}}{U_{\rm P}} + \frac{1}{3} \frac{U_{\rm P2}}{U_{\rm P}} = 0.617 4$$

上述计算没有考虑部件更替的影响,如果能够实现短时间替换,将减少实际部分故障情况下的运行时间。

4.2 指标统计与计算

将图 7 中的实际出力数据按照第 2 节中定义的 状态进行分类统计,计算分析第 3 节中的时间指标、 出力指标、系统指标,结果如表 2~表 4 所示。

表 2 时间指标结果 Tab. 2 Results of time indices

					h
$T_{ m FR}$	T_{RP}	$T_{ m RFP}$	$T_{ m FP}$	T_{A}	T_{N}
217	1 038	2 743	573	28	4 161
$T_{\rm RCP}$	$T_{ m FCP}$	$T_{ m P}$	T_{R}	T_{O}	T_{RE}
3 781	3 316	4 354	4 571	4 189	918.4

表 3 出力状态指标结果 Tab. 3 Results of power indices

$S_{\rm FR}/{ m kW}$	$S_{\mathrm{RP}}/\mathrm{kW}$	$S_{ m RFP}/{ m kW}$	$S_{\mathrm{FP}}/\mathrm{kW}$
3.864	0.758	0.468	2.386
$S_{ m P}/{ m kW}$	S/kW	D_{E}	$D_{ m M}$
0.972	0.579	0.105	1.008

表 4 系统总体指标结果 Tab. 4 Results of system indices

$\lambda_{\mathrm{S}}/(次 \cdot \mathrm{a}^{-1})$	rs/(h·次 ⁻¹)	A_{d}	$A_{\rm a}$
0.347	81.47	0.9968	0.522
$R_{ m FR}$	$R_{ m RCP}$	$R_{ m FCP}$	Е
0.024 8	0.432	0.379	0.201

从表 2 可以看出:光伏发电系统各状态中,夜晚停运状态时间最长,故障停运时间最少;运行时间稍大于停运时间,运行时间中减额运行时间占绝大部分比例,达 95%以上,资源限制下故障减额运行状态时间比例最大,由资源引起的和由故障引起的减额运行时间比例约为 1.14:1,资源限制是造成系统减额运行的主要原因。

从表 3 可以看出:全额等效出力大约占装机容量的 70%,故障减额等效出力约占 43%,资源限制减额等效出力只有约 14%,而资源限制下故障减额等效出力仅有 8.5%,由此可见资源的限制对系统出力的影响较大。系统最大出力略高于装机容量,平均出力仅占到装机容量的 10.5%左右。

表 4 结果表明:系统只考虑故障停运情况的可用率可达 99.68%,但实际中的可用率仅有 52.2%,说明无能源输入是造成系统停运的主要原因。设备故障减额运行率为 37.9%,这反映了光伏电池板串以及逆变器的故障概率偏高,且光伏发电系统组件发生部分故障的概率较大的实际情况,因此,提高组件的可靠性水平可以减少故障减额运行概率,提高可靠性。资源限制减额运行率为 43.2%,能源的利用效率为 20.1%,这既反映了输入能源的限制对系统产生了较大影响,也体现出光伏组件的实际能量转换效率偏低,提高光伏组件的转换效率,如设计逐日系统等可以有效提高系统的利用率,进而提高系统可靠性。

对于不同地区的分布式光伏发电系统,由于日辐射等自然条件、系统结构的不同,计算结果也不尽相同。但可以依照算例的计算方法,评价系统的实际可靠性并寻找影响系统可靠性的主要因素,这对于找寻分布式光伏发电系统的合理配置位置,以及系统的改进具有指导意义。

5 结语

分布式光伏发电系统的可靠性状态受到部件故障以及光照充裕度的影响,不能采用常规电源的可靠性模型来描述。本文详细分析了光伏发电系统结构故障情况,建立了综合考虑能源约束和系统结构特点的光伏发电系统六状态可靠性模型,涵盖不同季节,天气以及不同部件故障情况下的系统状态。

同时建立了相应的系统可靠性指标体系,通过 29 个指标从时间、出力、系统 3 个层面综合评价系统可靠性。算例分析结果表明,该模型以及指标体系能够全面反映出分布式光伏发电系统的运行情况、出力水平以及故障情况,反映系统实际运行可靠性。这为分析分布式光伏发电等间歇式新能源接入后对电力系统可靠性的影响提供了基础,为间歇式新能源的应用分析提供了可靠性判断依据。

参考文献

- [1] 林明耀,顾娟,单竹杰,等. 一种实用的组合式光伏并网系统孤岛 效应检测方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):85-89. LIN Mingyao, GU Juan, SHAN Zhujie, et al. A practical hybrid islanding detection method for grid-connected photovoltaic system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 85-89.
- [2] 李晶,许洪华,赵海翔,等.并网光伏电站动态建模及仿真分析 [J].电力系统自动化,2008,32(24):83-87.

 LI Jing, XU Honghua, ZHAO Haixiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid-connected PV power station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 83-87.
- [3] PARK J, LIANG W, CHO J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C]// Proceedings of Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-6.
- [4] LAUFFENBURGER H A, ANDERSON R T. Reliability terminology and formulae for photovoltaic power systems[J]. IEEE Trans on Reliability, 1982, 31(3): 289-295.
- [5] STEMBER L H, HUSS W R, BRIDGMAN M S. A methodology for photovoltaic system reliability & economic analysis[J]. IEEE Trans on Reliability, 1982, 31(3): 296-303.
- [6] COLLINS E, DVORACK M, MAHN J, et al. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system [C]// Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA: 2316-2321.
- [7] CHA S T, JEON D H, BAE I S, et al. Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 12-16, 2004, Ames, IA, USA: 451-456.
- [8] JEONGJE P, JAESEOK C, SHAHIDEHPOU M, et al. New efficient reserve rate index of power system including renewable energy generators[C]// Proceedings of Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 19-21, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 1-6.
- [9] BALAFAS C A, ATHANASSOPOULOU M D, ARGYROPOULOS T, et al. Effect of the diffuse solar radiation on photovoltaic inverter output [C]// Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, April 26-28, 2010, Valletta, Malta: 58-63.
- [10] YOKOYAMA R, NIIMURA T, SAITO N. Modeling and evaluation of supply reliability of microgrids including PV and

wind power [C]// Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-5.

- [11] 龚春景. 大容量太阳能光伏发电站交流输出功率计算方法研究 [J]. 华东电力,2009,37(8):1309-1312.
 - GONG Chunjing. Research on the calculation method of large capacity solar energy PV power generation station with AC output [J]. East China Electric Power, 2009, 37 (8): 1309-1312.
- [12] 栗然,李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力,2008,41(2);74-78.
 - LI Ran, LI Guangmin. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression

technique[J]. Electric Power, 2008, 41(2): 74-78.

[13] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京:清华大学出版 社,1985.

王 震(1986—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究 方向:含分布式光伏电源的配电网可靠性分析。E-mail: Wangz05@mails, tsinghua, edu, cn

鲁宗相(1974—),男,副教授,主要研究方向:电力系统可靠性、新能源及分布式发电、风力发电及微电网。E-mail: Luzongxiang98@tsinghua, edu. cn

段晓波(1959—),男,高级工程师,主要研究方向:电能质量及电网规划。

Reliability Model and Indices of Distributed Photovoltaic Power System

WANG Zhen¹, LU Zongxiang¹, DUAN Xiaobo², LI Xiaoming²

- (1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)
- Abstract: In recent years, the photovoltaic (PV) power system has gradually attracted widespread public attention. The rational reliability evaluation of PV power system is very important because of its volatility and intermittence. Based on an analysis of its structure and output characteristics, a six-state reliability model is developed with the energy constraints and the characteristics of system structure of the distributed PV power system taken into account. In addition, an index system is developed for comprehensively evaluating system reliability with respect to the timing, the output, and the system. Test results of an actual PV power system show that the reliability model and index system are rational and feasible and capable of reflecting the operation characteristics of the distributed PV power system, its output, fault characteristics and the reliability of its actual operation.

Key words: distributed generation; photovoltaic power generation; reliability model; indices system; renewable energy