

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.001

含光/柴混合发电的配电网可靠性评估模型

赵 渊¹, 张 煦¹, 林世溪², 赵勇帅¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 温州电力局, 浙江 温州 325000)

摘 要:光伏发电是目前很具潜力的发电形式之一,但光照强度的波动和间歇特性使得对含光伏发电的系统进行准确可靠性评估较为困难。分析了光伏发电系统(PVS)元件失效模式及其对PVS输出功率的影响,建立了元件故障阶数考虑至三阶时PVS的可靠性模型;将光照资源的不确定性和PVS的元件随机停运相组合,得出PVS输出功率的概率模型。根据孤岛外配电网元件故障对孤岛负荷可靠性的影响,定义了修复域、隔离域和零域的概念及其分层思想,有效计及了断路器/熔断器拒动影响。通过算例探讨了光伏发电系统对配电网可靠性的影响,计算结果表明光伏发电系统接入配电网能有效改善配电网供电可靠性。

关键词:光伏系统;可靠性评估;拒动;区域分层

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)11-001-07

A reliability evaluation model for photovoltaic/diesel hybrid power generation system

ZHAO Yuan¹, ZHANG Xu¹, LIN Shixi², ZHAO Yongshuai¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China;

2. Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou, Zhejiang 325000, China)

Abstract: Photovoltaic power generation is considered to be one of the most promising power generation forms. It is difficult to accurately assess the reliability of the photovoltaic system (PVS) for the volatility and intermittent of the light intensity. By analyzing PVS component failure modes and their impacts on PVS output power, the reliability model of PVS is built. Then the probability model of PVS output power is presented by considering both illumination uncertainty and PVS component random faults. According to the influence of components random faults outside the intentional islands on the reliability of load points inside the intentional islands, the concepts of repair zone, isolation zone and zero zone are defined. Furthermore, by considering the fail-operation of breaker and fuse, the concept for zone hierarchy is proposed, and the analytical formulas to calculate reliability indices of the load points inside the intentional islands are deduced. The application of the presented reliability evaluation model is clarified using a typical example to show the practicality and validity of the proposed approach.

Key words: photovoltaic system; reliability evaluation; fail-operation; zone hierarchy

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977094, 50607021); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2011BB6047); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A107); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007 DA10512711208)

作者简介: 赵渊(1974-), 男, 重庆大学教授, 博士, 主要从事电力系统规划与可靠性的研究工作, (E-mail) yuanzhao@msn. cn.

开发和利用安全、清洁、灵活的可再生分布式能源是减轻中国能源压力和保护环境的有效措施。光伏发电是其中潜力巨大的发电形式之一,与传统发电形式相比具有较强竞争优势^[1-3]。绝大部分光伏发电属并网型,其接入将改变传统配电网的网络拓扑:从一个辐射式的网络变为一个遍布电源和用户互联的网络,配电网可靠性评估模型也将相应发生变化。由于光照强度具有很强的随机性和间歇性,光伏发电系统接入电网后将带来很多不确定性因素^[4],且并网型光伏发电系统由很多元件组成,而各组成部分皆可能故障导致系统功率输出的改变,因此若能综合考虑光伏发电系统外部环境变化和内部物理特性,即将外部光照强度的波动性和内部元件的故障失效模式有机结合建立光伏发电系统输出功率的概率模型,则能更准确地对含并网型光伏发电系统的配电网进行可靠性评估分析。

考虑光伏发电接入配电网的可靠性评估,国内外已有一些研究。文献[4]根据光伏发电系统的拓扑结构和光照资源的限制,建立了六状态可靠性模型,但研究对象局限于独立光伏发电系统,且对光伏发电系统故障后果划分较为粗略,所建模型很难准确评估其接入配电网后对配电网可靠性的影响。文献[5]采用解析法和模拟法分别给出了风电和光伏发电的多状态电源模型和时变负荷模型,但可靠性评估模型仅考虑了光照强度变化对系统可靠性的影响。文献[6]采用模拟法分析了天气对光伏发电系统元件的故障率和故障恢复时间的影响,但光伏系统的故障模式只考虑了系统完全失效,没有分析其部分失效模式及相应输出功率。

借鉴上述文献的优点和不足,笔者对含并网型光伏发电系统的配电网可靠性评估展开研究,考虑光伏发电系统各组成元件的可靠性和光照强度的波动性对输出功率的综合影响,并进一步分析光伏发电系统与配电网的互动影响,提出了光/柴混合发电系统接入配电网后对配电网可靠性影响的评估模型和算法。

1 光/柴混合发电系统电源模型

配电网正常运行时,光/柴混合发电系统并网运行,与主电源一起共同为配电网各负荷点提供电力。当配电网主馈线故障时,在配电网内将形成一个小自治电力系统——孤岛,孤岛成功运行的条件是岛内电源出力大于等于岛内负荷需求。受光照强度不确定性的影响,光伏发电的功率输出具有很强随机性和间歇性,而孤岛负荷也处于不断动态变化

中^[7],岛内可能频繁出现光伏发电和负荷功率不平衡的现象,导致频率偏移过大,孤岛失去稳定运行。为使孤岛频率可控,孤岛电源除光伏发电外,通常还需配置输出功率较稳定且调节的传统分布式电源,例如柴油发电机组,并通过其励磁或调速器控制使孤岛运行在频率可控制的范围内^[8]。

1.1 计及光伏系统元件故障的输出功率概率模型

光伏发电系统的输出功率与其元件故障情况和光照强度大小密切相关,元件故障和光照强度是彼此独立的随机事件,可分别计及其各自影响进行研究,然后再综合建模。本节首先研究光伏发电系统元件随机故障对输出功率的影响。

并网型光伏发电系统主要由光伏阵列、直流防雷汇流箱、逆变器、交流配电柜和升压变经串并联构成^[9-10],整个系统的拓扑结构如图1所示。

由于光伏发电系统(PVS)的监测、保护和控制等二次设备失效的概率远低于一次设备,故可重点考虑PVS一次设备故障对输出功率的影响。根据元件串并联关系,将光伏发电系统划分为3个层次,第1层为光伏阵列-熔断器层;第2层为直流断路器-逆变器-交流断路器层;第3层为交流汇流母线-交流隔离开关-并网断路器-升压变层。

第1层设光伏电池模块和熔断器的故障率分别为 λ_c 和 λ_f ,平均故障修复时间分别为 r_c 和 r_f 。根据串并联系统可靠性指标计算公式^[11],则光伏电池串故障率 λ_1 、故障修复时间 r_1 和无效率 U_1 为

$$\lambda_1 = n\lambda_c + \lambda_f, \quad (1)$$

$$r_1 = \frac{n\lambda_c r_c + \lambda_f r_f}{\lambda_1}, \quad (2)$$

$$U_1 = \lambda_1 r_1. \quad (3)$$

第2层设直流断路器、逆变器和交流断路器的故障率分别为 λ_{db} 、 λ_1 和 λ_{ab} ,故障修复时间分别为 r_{db} 、 r_1 和 r_{ab} ,则第2层元件故障率 λ_2 、故障修复时间 r_2 和无效率 U_2 为

$$\lambda_2 = \lambda_{db} + \lambda_1 + \lambda_{ab}, \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{\lambda_{db} r_{db} + \lambda_1 r_1 + \lambda_{ab} r_{ab}}{\lambda_2}, \quad (5)$$

$$U_2 = \lambda_2 r_2. \quad (6)$$

第3层设交流汇流母线、交流隔离开关、并网断路器和升压变的故障率分别为 λ_b 、 λ_{as} 、 λ_{gb} 和 λ_T ,故障修复时间分别为 r_b 、 r_{as} 、 r_{gb} 和 r_T ,则第3层元件故障率 λ_3 、故障修复时间 r_3 和无效率 U_3 分别为

$$\lambda_3 = \lambda_b + \lambda_{as} + \lambda_{gb} + \lambda_T, \quad (7)$$

$$r_3 = \frac{\lambda_b r_b + \lambda_{as} r_{as} + \lambda_{gb} r_{gb} + \lambda_T r_T}{\lambda_3}, \quad (8)$$

$$U_3 = \lambda_3 r_3. \quad (9)$$

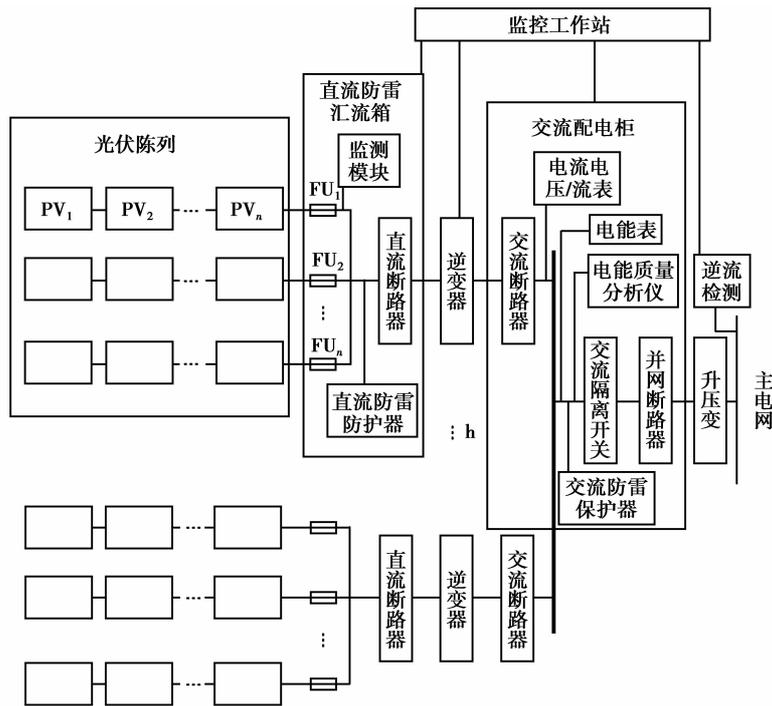


图 1 光伏发电系统结构图

第 1 层元件故障考虑至 3 阶,第 2 层考虑至 2 阶,第 1、2 层交叠故障考虑至 3 阶;第 3 层考虑至 1 阶。设 i, j, k 分别表示第 1、2、3 层元件故障阶数; $i+j$ 为 1、2 层组合故障阶数,则光伏发电系统无故障、部分故障和完全停运表示为

$$\begin{cases} 0 \leq i \leq 3, \\ 0 \leq j \leq 2, \\ 0 \leq i+j \leq 3, \\ 0 \leq k \leq 1, \\ i, j, k \in \text{整数}。 \end{cases} \quad (10)$$

光伏发电系统与元件故障模式相对应的输出功率 P_{ijk} 及其概率 U_{ijk} 的数学模型为

$$P_{ijk} = (1-k) \frac{(h-j)m-i}{hm} P_r \eta, \quad (11)$$

$$U_{ijk} = (1-k) C_{(h-j)m}^i U_1^i (1-U_1)^{(h-j)m-i} + k U_3, \quad (12)$$

式中: P_r 为光伏发电系统的额定容量; η 为逆变器的逆变效率,取 $\eta=0.95$ 。

1.2 时变光照强度下光伏系统输出功率概率模型

光伏系统输出功率不仅与其故障模式有关,还与光照强度密切相关。只考虑光照强度变化时的光伏系统输出功率模型可参考文献[2],取标准光照强度 I_s 为 1000 W/m^2 ;光电转换效率达到最大时的光照强度 $K_c=150 \text{ W/m}^2$ 。

为降低计算复杂性,以年小时平均光照强度代

替实际光照强度,将年光照强度值按 100 W/m^2 的间距分成多组光照强度值,统计各组光照强度值一年中出现的小时数并计算其出现概率,年小时光照强度值及其概率采用文献[2]中的统计数据。

1.3 光伏系统功率输出概率模型

将光伏系统的元件故障和光照强度 I_t 变化下的输出功率 $P(I_t)$ 相组合,得出同时计及二者随机性的光伏系统输出功率 $P_{ijk}(I_t)$ 及其概率 $U_{ijk}(I_t)$:

$$P_{ijk}(I_t) = \frac{P_{ijk}}{P_r} P(I_t), \quad (13)$$

$$U_{ijk}(I_t) = U_{ijk} U(I_t), \quad (14)$$

式中 $U(I_t)$ 是光照强度为 I_t 的概率。

1.4 光/柴混合发电系统输出功率模型

本文中柴油发电机组作为备用电源,其可靠性模型采用“运行-停运”两状态模型,设其强迫停运率为 U_d ,可用容量为 P_d 。采用离散卷积算法,得到光/柴混合发电系统的功率输出 P_{DG} 及其概率 U_{DG} ,其中 x 表示柴油发电机组运行状态, $x=1$ 表示正常运行, $x=0$ 表示故障停运。

$$P_{DG} = P_{ijk}(I_t) + x P_d, \quad (15)$$

$$U_{DG} = U_{ijk}(I_t) * [x(1-U_d) + (1-x)U_d]. \quad (16)$$

2 孤岛发电-负荷功率相匹配的概率模型

研究所用负荷模型采用文献[12]中 IEEE-

RTS79 可靠性测试系统的年小时负荷模型。当配电网主馈线故障时,光/柴混合发电系统及其周围负荷点与主馈线分离,按计划孤岛方式运行,因光伏系统输出功率和孤岛负荷的随机变化,孤岛电源可用出力与负荷相匹配的概率 p 为

$$p = \sum_{i=1}^{8736} \left(\sum_{j=0}^m p_{DGj} \right) p_{Li}, \quad (17)$$

式中: m 为光/柴混合发电系统可用出力大于等于第 i 小时负荷需求的出力状态数; p_{DGj} 为其中第 j 个状态的发生概率; p_{Li} 为孤岛内第 i 个小时负荷出现的概率,且 $p_{Li} = 1/8736$ 。

3 孤岛负荷点可靠性指标计算公式

3.1 孤岛的修复域、隔离域和零域的定义

根据孤岛外元件故障对孤岛影响的不同,将配电网划分为修复域、隔离域和零域,分别定义如下。

修复域。配电网某些区域的元件故障导致孤岛从脱网至重新并网所需时间为故障元件的修复时间,则这些区域称为修复域,用符号 R 表示。

隔离域。配电网某些区域的元件故障导致孤岛从脱网至重新并网所需时间为故障隔离时间,则这些区域称为隔离域,用符号 I 表示。

零域。配电网某些区域的元件故障不会影响到孤岛的并网运行,这些区域称为零域,用 Z 表示。

配电网中通常配置多个断路器和熔断器,故障发生时,不同位置断路器/熔断器拒动对孤岛的影响程度各异,按影响程度对其进行分级分类。首先给出上级断路器和下级断路器/熔断器的定义:从配电网中某断路器/熔断器所在位置逆潮流方向搜索,首遇断路器称为该断路器/熔断器的上级断路器,相应的,该断路器/熔断器称为此上级断路器的下级断路器/熔断器。断路器和熔断器分层概念如图 2 所示。

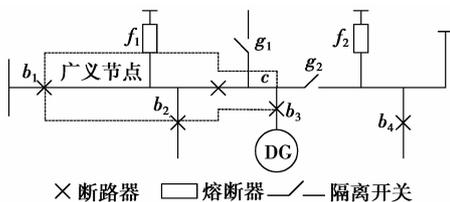


图 2 1 级断路器和熔断器的定位

将计划孤岛在主馈线上的并网点 c 与主馈线始端出线断路器 b_1 之间的主馈线看成一广义节点,从该广义节点顺潮流方向展开广度优先搜索,在各个方向搜索到的首遇断路器(b_2 、 b_3 、 b_4)或熔断器(f_1 、 f_2)称为 1 级断路器/熔断器。2 级断路器/熔断器是 1 级断路器的相邻下级断路器/熔断器;类似可进一步归

类为 3 级及以上的断路器/熔断器。为避免可靠性评估过于复杂,假设主馈线出线断路器 b_1 完全可靠。

为计入断路器/熔断器拒动影响,给出如下定义:按前述修复域、隔离域和零域定义所得配电网区域划分,称为第 1 层修复域、隔离域和零域;设断路器/熔断器保护区域范围内元件故障时拒动,由上级断路器动作切除故障,按定义得到配电网区域划分,称为第 2 层修复域、隔离域和零域;设连续两级断路器/熔断器在保护区域范围内元件故障时拒动,按定义所得配电网区域划分,称为第 3 层区域。考虑连续两级保护断路器/熔断器同时拒动概率很小,本文算例分析只考虑至第 2 层区域划分。

3.2 孤岛负荷点可靠性指标计算公式

当孤岛修复域或隔离域元件故障时,孤岛并网断路器跳开,由于光伏发电系统不能独自稳定运行,柴油发电机组快速启动,与光伏发电系统一起同期并网对孤岛负荷供电。当孤岛修复域、隔离域和孤岛内元件故障时,孤岛内第 k 个负荷点的停运率 λ_k 、平均故障恢复时间 r_k 和年停电时间 U_k 为

$$\lambda_k = \sum_{j=1}^{(N_{R_3} + N_{I_3} + n)} Q_j \lambda_j, \quad (18)$$

$$U_k = (p \sum_{j=1}^{(N_{R_3} + N_{I_3})} Q_j \lambda_j) T_s + (1-p) \left(\sum_{j=1}^{N_{R_3}} Q_j \lambda_j r_j + \sum_{j=1}^{N_{I_3}} Q_j \lambda_j T_g \right) + \sum_{j=1}^n Q_j \lambda_j r_j, \quad (19)$$

$$r_k = U_k / \lambda_k, \quad (20)$$

式中: N_{R_3} 、 N_{I_3} 和 n 分别表示孤岛的 3 层修复域、隔离域和孤岛内的元件总数; λ_j 和 r_j 分别表示其中第 j 个元件的故障率和平均修复时间; Q_j 为熔断器或断路器的等效拒动概率,如果元件 j 位于主馈线出线断路器的主保护范围,则 $Q_j = 1$,如果元件 j 位于 1 级断路器的主保护范围($j \in (R_2 - R_1)$),则 Q_j 为该 1 级断路器的拒动概率;如果元件 j 位于 2 级断路器/熔断器的保护范围($j \in (R_3 - R_2)$),则 Q_j 为该 2 级断路器/熔断器及其上级断路器同时拒动的概率;对于孤岛内的元件,如果负荷点 k 与元件 j 处于同一熔断器或并网断路器的主保护范围或者元件 j 位于并网断路器的主保护范围,则 $Q_j = 1$,否则, Q_j 取元件 j 的保护熔断器拒动概率; p 为光/柴混合发电系统的输出功率与负荷相匹配概率,见式(17); T_s 为光/柴混合发电系统成功启动所花时间, T_g 为故障隔离时间。

4 算例分析

笔者采用 IEEE-RBTS Bus6 的主馈线 F4 开展

可靠性评估分析,如图 3。线路参数和负荷点用户数见文献[13],配网元件可靠性参数见文献[14],光伏发电系统的元件可靠性参数见文献[9-15],假设断路器和熔断器拒动的概率为 0.1,隔离开关操作时间 $T_g=1$ h,孤岛成功运行所需时间 $T_s=0.1$ h,柴油机组强迫停运率为 0.05^[5],每块光伏电池模块额定输出功率为 230 W,每台逆变器交流侧额定功率为 100 kW,年小时光照强度及其概率见文献[2]。

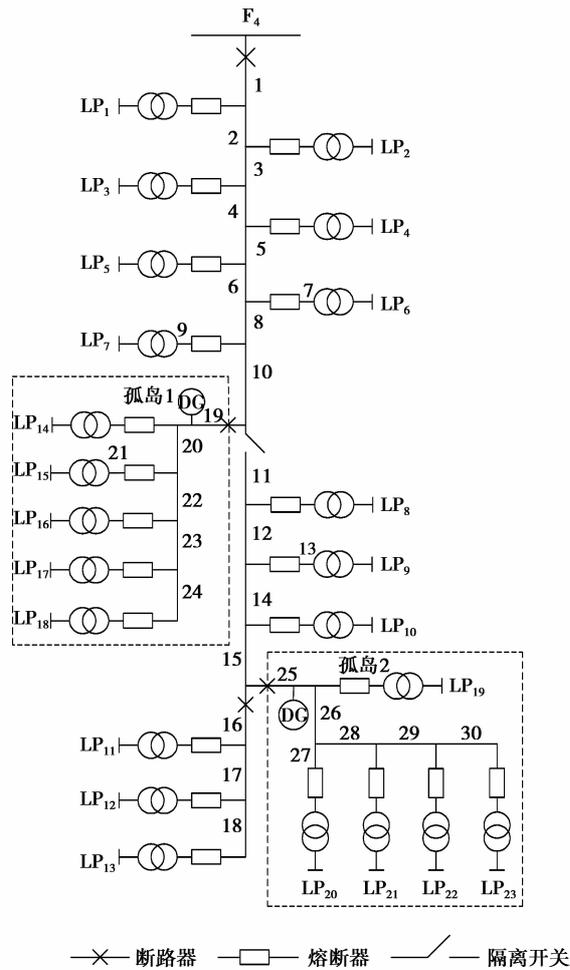


图 3 RBTS Bus6 的主馈线 F4

采用 7 种研究方案对不含和含有光伏发电系统的配电网展开可靠性评估分析。

方案 1。对不含光伏发电系统的常规配电网可靠性评估,不考虑断路器和熔断器拒动的概率,按第 1 层区域划分思想划分。

方案 2。与方案 1 不同之处是计及断路器和熔断器拒动的概率,按第 2 层区域划分思想划分。

方案 3。不计光/柴混合发电系统故障,将光/柴总容量为孤岛峰荷的 1.15 倍且光/柴容量比为 4:6^[16]的混合发电系统接入孤岛 1,计及断路器和熔断器的拒动概率。

方案 4。与方案 3 不同之处是考虑光伏发电系统和柴油发电机组故障的可能性。

方案 5。与方案 4 不同之处是将光/柴混合发电系统接入孤岛 2。

方案 6。与方案 5 不同之处是分多组光/柴容量比,分别是 2:8、4:6、6:4、8:2。

方案 7。考虑光/柴混合发电系统的随机故障,将其接入孤岛 2,光伏发电容量为孤岛峰荷的 100%,柴油发电机组容量分别为孤岛峰荷的 20%、40%、60%、80%,计及断路器和熔断器的拒动概率。

对上述 7 个方案进行研究,计算出方案 3~5 孤岛电源出力与负荷相匹配的概率 p 分别为 0.776 7、0.737 8、0.737 5,方案 6、7 孤岛电源出力与负荷相匹配的概率 p 如表 1,进一步得出每一方案 5 个典型负荷点和系统可靠性指标(LP16 和 LP21 分别代表了孤岛 1 和孤岛 2 的负荷点),如表 2~5。

表 1 孤岛电源出力与负荷相匹配的概率 p

方案	孤岛电源出力与负荷相匹配的概率 p			
	20%	40%	60%	80%
方案 6	0.946 0	0.737 5	0.368 3	0.182 8
方案 7	0.184 1	0.314 4	0.629 0	0.887 5

说明:方案 6 和方案 7 中的 S_{DG} 分别是光伏发电和柴油机组发电额定容量占孤岛峰荷的百分比。

表 2 某些负荷点的停运率

方案	平均故障率 $\lambda/(\text{次} \cdot \text{年}^{-1})$				
	LP3	LP9	LP12	LP16	LP21
方案 1	1.627 5	1.711 5	2.225 0	2.537 0	2.511 0
方案 2	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3
方案 3	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3
方案 4	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3
方案 5	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3
方案 6	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3
方案 7	1.924 2	1.959 3	2.424 5	2.715 0	2.691 3

表 3 某些负荷点的平均故障修复时间

方案	平均故障修复时间 $r/(\text{h} \cdot \text{次}^{-1})$				
	LP3	LP9	LP12	LP16	LP21
方案 1	5.023 3	6.709 0	6.314 6	5.015 4	6.164 9
方案 2	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	7.608 5
方案 3	5.556 7	7.836 4	7.533 5	3.812 2	7.608 5
方案 4	5.556 7	7.836 4	7.533 5	3.920 9	7.608 5
方案 5	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	4.353 8

续表 3

方案	平均故障修复时间 $r/(h \cdot \text{次}^{-1})$					
	LP3	LP9	LP12	LP16	LP21	
方案 6	20%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	3.431 9
	40%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	4.353 8
	60%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	5.983 1
	80%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	6.801 7
方案 7	20%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	6.796 0
	40%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	6.201 4
	60%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	4.832 6
	80%	5.556 7	7.836 4	7.533 5	5.933 2	3.691 8

表 4 某些负荷点的年停电时间

方案	平均停电时间 U/h					
	LP3	LP9	LP12	LP16	LP21	
方案 1	8.401 5	11.482 5	14.050 0	12.724 0	15.480 0	
方案 2	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	20.476 3	
方案 3	10.692 4	15.354 1	18.264 9	10.350 0	20.476 3	
方案 4	10.692 4	15.354 1	18.264 9	10.645 1	20.476 3	
方案 5	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	11.936 6	
方案 6	20%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	9.236 2
	40%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	11.936 6
	60%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	16.102 1
	80%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	18.305 2
方案 7	20%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	18.289 8
	40%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	16.961 6
	60%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	13.005 8
	80%	10.692 4	15.354 1	18.264 9	16.108 6	9.935 7

表 5 系统可靠性指标

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	
方案 1	1.977 8	11.074 7	5.599 4	0.998 74	
方案 2	2.202 7	14.330 7	6.505 8	0.998 36	
方案 3	2.202 7	13.561 5	6.156 6	0.9984 5	
方案 4	2.202 7	13.601 0	6.174 5	0.9984 5	
方案 5	2.202 7	13.160 8	5.974 7	0.9985 0	
方案 6	20%	2.202 7	12.829 4	5.824 3	0.998 54
	40%	2.202 7	13.160 8	5.974 7	0.998 50
	60%	2.202 7	13.746 4	6.240 6	0.998 43
	80%	2.202 7	14.040 7	6.374 2	0.998 40
方案 7	20%	2.202 7	14.038 6	6.373 2	0.998 40
	40%	2.202 7	13.831 9	6.279 4	0.998 42
	60%	2.202 7	13.332 9	6.052 8	0.998 48
	80%	2.202 7	12.922 9	5.866 7	0.998 52

1)从方案 1、2 结果可见,方案 2 可靠性评估结果较方案 1 差,主要原因是:方案 2 计及了断路器和熔断器拒动,影响负荷点可靠性的区域为该负荷点第 2 层修复域和隔离域,而影响方案 1 负荷点可靠性的区域仅是该负荷点第 1 层修复和隔离域。

2)从方案 2、3 的结果可见,配电网接入光/柴混合发电系统后,孤岛外负荷点可靠性指标没有变化,孤岛内负荷点除停运率不变外,其他可靠性指标和系统可靠性指标都得到明显改善。

3)从方案 3、4 的评估结果和表 6 可见,考虑光/柴混合发电系统自身的可靠性,计算出的孤岛电源出力与负荷相匹配的概率要略小于没有考虑时的计算结果,由此导致方案 4 的可靠性评估结果要差一些,但这种评估结果与实际更相符。

4)从方案 4、5 的评估结果可见,在相同条件下,将光/柴混合发电系统接入孤岛 2 所得孤岛负荷点和系统可靠性指标要明显优于其接入孤岛 1 时的结果。其原因是:孤岛 2 较孤岛 1 远离变电站,未接入光/柴混合发电系统前,孤岛 2 的负荷可靠性差于孤岛 1,而接入光/柴混合发电系统后,对孤岛 1、2 的负荷可靠性改善程度基本相同。

5)由方案 6 可见,随光/柴容量比的提高,孤岛负荷点和系统可靠性指标变差,原因是光伏发电系统输出功率具有很强随机性,随光伏发电系统容量增加,将导致孤岛电源出力与负荷相匹配的概率大大减小,且光伏发电系统元件修复时间也较长。

6)由方案 7 可见,随柴油发电机组容量增加,孤岛负荷点和系统可靠性指标均得到很好改善,是因为柴油发电机组功率输出较稳定且可调。将方案 7、6 的结果相比较,充分体现了光伏发电系统输出功率波动性和随机性对可靠性的不利影响。

5 结 论

提出了计及 PVS 失效模式与光照资源不确定性的 PVS 输出功率概率模型,采用光/柴混合发电多状态输出功率模型,建立了孤岛出力与负荷相匹配的概率数学模型。在配电网可靠性评估中,提出孤岛(负荷点)的修复域、隔离域和零域的概念,并计及断路器和熔断器拒动影响,提出分层思想。算例表明断路器和熔断器拒动对配电网可靠性影响很大;并网型光伏发电系统接入配网后,能较好改善孤岛负荷点和整个系统可靠性,但改善程度依赖柴油发电机组容量大小。

参考文献:

- [1] 张改景,龙惟定,苑翔. 光伏发电系统的碳值分析[J]. 重庆大学学报,2011,34(11):133-140.
ZHANG Gaijing, LONG Weiding, YUAN Xiang. Embodied-carbon analysis of renewable energy utilization system[J]. Journal of Chongqing University, 2011,34(11):133-140.
- [2] PARK J, WU L, CHOI J, et al. A Probabilistic reliability evaluation of power system including solar/ photovoltaic cell generator[C]// Proceedings of 2009 IEEE Power And Energy General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Piscataway: IEEE Press, 2009:1-6.
- [3] 崔文智,于松强,廖全. 聚光型混合光伏光热系统热性能分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(1):86-90.
CUI Wenzhi, YU Songqiang, LIAO Quan. Performance analysis of a concentrating solar hybrid photovoltaic-thermal system[J]. Journal of Chongqing University, 2009,32(1):86-90.
- [4] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):18-24.
WANG Zhen, LU Zongxiang, DUAN Xiaobo, et al. Reliability model and indices of distributed photovoltaic power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(15):18-24.
- [5] ATWA Y M, SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(4):1945-1952.
- [6] 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 2004 International Conference On Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 12-16, 2004, Ames IA, Piscataway: IEEE Press, 2004,451-456.
- [7] 孙瑜, BOLLEN M, AULT G. 孤岛状态下含分布式电源的配电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2008,32(23):77-81.
SUN Yu, BOLLEN M, AULT G. Reliability analysis of island distribution systems with distributed energy resources [J]. Power System Technology, 2008, 32(23):77-81.
- [8] BAE I S, KIM J O. Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007,2(22):785-790.
- [9] ZINI G, MANGEANT C, MERTEN J. Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic system [J]. Renewable Energy, 2011,36(9):2334-2340.
- [10] 李瑞生,周逢权,李燕斌. 地面光伏发电系统及运用[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [11] 别林登 R. 工程系统可靠性评估—原理和方法[M]. 周家启,黄雯莹,译. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1988.
- [12] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system [J]. IEEE Transactions on Power Apparats and Systems, 1979,98(6):2047-2054.
- [13] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996,11(4):1670-1676.
- [14] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purpose basic distribution system data and results [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1991,6(2):813-820.
- [15] ZHANG P, WANG Y, XIAO W D, et al. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2012,3(3):379-389.
- [16] KARKI R, BILLINTON R. Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply [J]. IEEE Transactions on Energy Convers, 2004,3(2):435-440.

(编辑 张 莘)