

Journal of System Simulation

Volume 31 | Issue 4

Article 25

11-20-2019

Comparison and Analysis of Output Performance of Different PV Structures under Shadows

Yonghong Xia

1. School of Information Engineering Nanchang University, Nanchang 330031, China; ;2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; ;

Mengru Li

1. School of Information Engineering Nanchang University, Nanchang 330031, China; ;

Jianbo Xin

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; ;

Zen Fanpeng

3. Jiangsu LinYang Energy Co.,Ltd, Qidong 226200, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>

 Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Comparison and Analysis of Output Performance of Different PV Structures under Shadows

Abstract

Abstract: The output power of PV array not only depends on the irradiance intensity of the partial shadows, but also on the shadows shape. *For the serious power loss under partial shadows of the traditional SP (Series-Parallel) and TCT (Total-Cross-Tied) structures, an optimized TCT structure is proposed.* Output capacity comparison was made based on the three structures in five shadow modes under the circumstances of the severe shadows and uneven irradiation. By using Matlab/ Simulink software, the output performance of the three structures was simulated under different shadow shapes in symmetrical and asymmetric arrays. The results show that PV array with the optimized TCT structure works better in the different shadow conditions, which can provide selection references for the array structure in the construction of photovoltaic plants.

Keywords

photovoltaic module, array structure, partially shading, optimization configuration

Authors

Yonghong Xia, Mengru Li, Jianbo Xin, Zen Fanpeng, and Yunjun Yu

Recommended Citation

Xia Yonghong, Li Mengru, Xin Jianbo, Zen Fanpeng, Yu Yunjun. Comparison and Analysis of Output Performance of Different PV Structures under Shadows[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 802-810.

阴影下不同光伏阵列结构输出性能对比与分析

夏永洪^{1,2}, 李梦茹¹, 辛建波², 曾繁鹏³, 余运俊¹

(1.南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2.国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;
3.江苏林洋能源股份有限公司, 江苏 启东 226200)

摘要: 光伏阵列的输出功率不仅取决于阴影处辐照度的强弱, 还与阴影形状有关。针对传统 SP(Series-parallel) 结构、TCT(Total-Cross-Tied) 结构在某些阴影情况下功率损失较严重的问题, 提出了一种优化的 TCT 结构。在严重遮挡和辐照不均匀两种情况下, 设置了 5 种阴影模式, 对比分析了 3 种结构的输出能力。采用 Matlab/Simulink 软件, 仿真了不同的阴影形状, 以及对称阵列和不对称阵列下 3 种结构的输出性能, 仿真结果表明: 优化 TCT 结构能更好的适应不同的阴影情况, 为光伏电站建设时阵列结构的选择提供了参考。

关键词: 光伏组件; 阵列结构; 阴影遮挡; 优化配置

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0802-09
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0142

Comparison and Analysis of Output Performance of Different PV Structures under Shadows

Xia Yonghong^{1,2}, Li Mengru¹, Xin Jianbo², Zen Fanpeng³, Yu Yunjun¹

(1. School of Information Engineering Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 3. Jiangsu LinYang Energy Co.,Ltd, Qidong 226200, China)

Abstract: The output power of PV array not only depends on the irradiance intensity of the partial shadows, but also on the shadows shape. For the serious power loss under partial shadows of the traditional SP (Series-Parallel) and TCT (Total-Cross-Tied) structures, an optimized TCT structure is proposed. Output capacity comparison was made based on the three structures in five shadow modes under the circumstances of the severe shadows and uneven irradiation. By using Matlab/ Simulink software, the output performance of the three structures was simulated under different shadow shapes in symmetrical and asymmetric arrays. The results show that PV array with the optimized TCT structure works better in the different shadow conditions, which can provide selection references for the array structure in the construction of photovoltaic plants.

Keywords: photovoltaic module; array structure; partially shading; optimization configuration

引言

光伏系统的效率易受环境因素的影响, 如: 云

层, 电线杆, 树木等造成的阴影而降低。如何在光伏阵列表面光照不均匀时提升发电量, 削弱遮阴造成的失配问题已成为一个研究重点^[1]。

传统光伏阵列通常采用串并联的方式(Series-parallel, SP)进行组件连接。在组件串内单个组件受阴影产生不同的光生电流时, 易产生热斑效应, 通常并联旁路二极管来防止光伏组件的损坏。网状连接(Total-Cross-Tied, TCT)在光伏组件串之间引



收稿日期: 2017-03-24 修回日期: 2017-06-14;
基金项目: 国际科技合作专项(2014DFG72240);
作者简介: 夏永洪(1978-), 男, 江西丰城, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为电机及其控制、分布式发电及微网; 李梦茹(1993-), 女, 江苏徐州, 硕士生, 研究方向为光伏电站能效优化。

入了附加的连接^[2], 当阴影造成某个组件中的电流变化, 这种拓扑结构可使不同电流流经不同组件串, 从而减小被遮挡组件中的电流, 使其工作在正向偏压区并输出一部分功率, 以提高系统阴影下的输出能力^[3]。由于阴影分布区域及面积大小同时影响着光伏阵列输出功率, 许多学者通过研究阵列重构及组态优化来减轻其影响。文献[4]提出了一种基于模糊控制的自适应重构方法。阴影时通过模糊计算, 将光伏阵列重新配置, 利用开关矩阵的闭合切除阴影模块, 避免功率损失, 随后再进行阵列的补偿。但阴影模块亦有功率输出, 此方法造成了一定功率的浪费。文献[5]将每个光伏组件配备了一个继电器开关, 通过对组件工作状态的实时监测, 控制继电器开关网络来调整阵列拓扑结构, 以适应阴影分布。文献[6]将光伏阵列分为固定部分和可调整部分, 阴影时将可调整部分具有最大开路电压的电池元并联到固定部分具有最小电压的一行, 减小因电池串并联产生的电压电流限制。文献[4-6]的基本思想均为用可控开关调整光伏阵列, 即电气阵列重构技术(Electrical Array Reconfiguration, EAR)。该方法不仅需要改变阵列的电气结构, 还需要多个传感器及继电器。文献[7]提出改进 TCT 结构布置从而增强阴影条件下的发电能力。这种配置方案通过调整相同列光伏组件的次序, 减少同一行组件受阴影遮挡的数量。由于阵列的电气结构不改变, 所以其特性与 TCT 布置相同, 但只适用于对称光伏阵列。文献[8]在文献[7]的基础上提出了一种基于任意 $m \times n$ 阵列的 TCT 重构方案, 这种结构比需要继电开关来重新配置的阵列结构更简单, 并可以确保系统运行的可靠性。但其所考虑的阴影情况不全面, 且没有对对称阵列使用重构规则后的性能进行验证。因此, 本文利用 TCT 重构算法分别构造了对称及不对称的光伏阵列, 通过 Matlab/Simulink 软件搭建仿真模拟在不同的阴影形状及辐照强度下的输出性能, 同时与处在同一环境下的 SP、TCT 结构进行对比分析, 评估三种阵列结构阴影下的输出能力, 以适应场景需要选择最优配置。

1 TCT 优化模型

在 TCT 结构中, 同一列的光伏组件串联连接, 同一行的模块并联连接。本文构造了 2 个阵列结构, 分别为 11×9 阵列及 12×12 阵列, 如图 1 所示。每个光伏组件以 “mn” 表示其所在的行及列。例如, 编号 23 的组件表示其位于阵列中的二行三列。

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

(a) 11×9 阵列

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(b) 12×12 阵列

图 1 阵列排布示意图
Fig. 1 Array arrangement

该优化模型是保持 PV 阵列第一列不变, 将从第二列开始的光伏组件重新排布, 把光伏组件下移, 确保原先处在同一行的组件在优化后分散到光伏阵列的不同行, 且相邻两列原先处在同一行的组件经优化后行位置应尽量错开。图 2 示出了图 1 经过重新调整布置的 TCT 结构。这种配置方式不

改变原来光伏组件的电气连接，仅改变了放置位置。如 11×9 阵列中的光伏组件 62(第六行，第二列)放置在第一行第二列上，但依旧保持与组件 61 的并联关系。图 3 为部分组件的电气连接。实际应用中，按照图 3 所示的电气连接关系进行组件连接，即可实现该优化方法。

11	62	113	54	105	46	97	38	89
21	72	13	64	115	56	107	48	99
31	82	23	74	15	66	117	58	109
41	92	33	84	25	76	17	68	119
51	102	43	94	35	86	27	78	19
61	112	53	104	45	96	37	88	29
71	12	63	114	55	106	47	98	39
81	22	73	14	65	116	57	108	49
91	32	83	24	75	16	67	118	59
101	42	93	34	85	26	77	18	69
111	52	103	44	95	36	87	28	79

(a) 11×9 阵列

11	82	23	74	125	56	107	38	99	410	1111	612
21	92	33	84	15	66	117	48	109	510	1211	712
31	102	43	94	25	76	127	58	119	610	111	812
41	112	53	104	35	86	17	68	129	710	211	912
51	122	63	114	45	96	27	78	19	810	311	1012
61	12	73	124	55	106	37	88	29	910	411	1112
71	22	83	14	65	116	47	98	39	1010	511	1212
81	32	93	24	75	126	57	108	49	1110	611	112
91	42	103	34	85	16	67	118	59	1210	711	212
101	52	113	44	95	26	77	128	69	110	811	312
111	62	123	54	105	36	87	18	79	210	911	412
121	72	13	64	115	46	97	28	89	310	1011	512

(b) 12×12 阵列图 2 优化配置的 TCT 结构
Fig. 2 Optimized TCT structure

2 光伏阵列阴影下性能对比分析

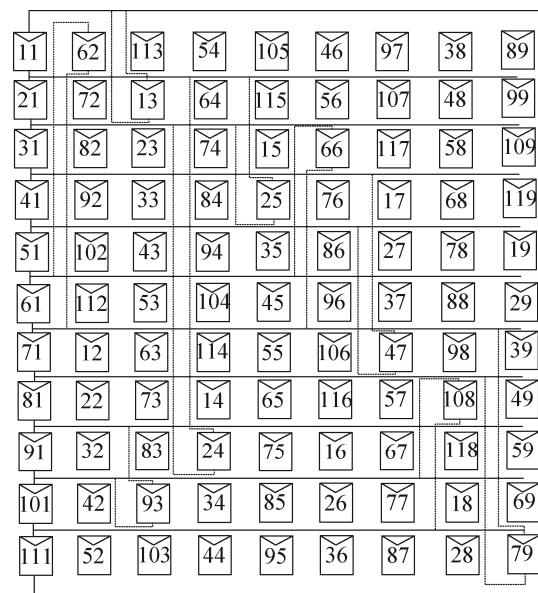
为了对比 3 种阵列结构在不同阴影时的输出能力，定义 5 种阴影模式：短宽型、短窄型、长宽型，长窄型，对角线型。对于不同的阴影模式，分 2 种情况讨论：

(1) 光伏组件的阴影遮蔽较为严重，几乎无发

电能力，此种情况下将辐照度设为 100 W/m^2 ，正常光照部分的辐照度为 1000 W/m^2 。

(2) 云彩树荫灰尘等造成的光伏组件表面辐照度不均匀。根据辐照度的渐变情况，选取 1000 W/m^2 ， 700 W/m^2 ， 500 W/m^2 ， 100 W/m^2 作为典型值，且设所有组件温度为 25°C 。

光伏组件参数如表 1 所示。

图 3 电气结构连接图
Fig. 3 Electrical connection表 1 光伏组件参数
Tab. 1 PV module parameters

参数	数值
功率 P/W	245
短路电流 I_{sc}/A	8.74
开路电压 V_{oc}/V	37.1
最大功率点电流 I_{mpp}/A	8.17
最大功率点电压 V_{mpp}/V	30

2.1 严重遮挡时光伏阵列输出性能

2.1.1 短宽型阴影图形下阵列工作原理及性能分析

阴影在对称及不对称的 TCT 及优化配置的 TCT 结构上的分布如图 4(a)~(b)、图 5(a)~(b)所示。由于优化配置的 TCT 结构并没有改变原 TCT 结构的电气连接，因此阴影在实际的电气结构中的分布如图 4(c)、5(c)所示。阴影处辐照度设为 100 W/m^2 。

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(a) TCT

11	82	23	74	125	56	107	38	99	410	111	612
21	92	33	84	15	66	117	48	109	510	1211	712
31	102	43	94	25	76	127	58	119	610	111	812
41	112	53	104	35	86	17	68	129	710	211	912
51	122	63	114	45	96	27	78	19	810	311	1012
61	12	73	124	55	106	37	88	29	910	411	1112
71	22	83	14	65	116	47	98	39	1010	511	1212
81	32	93	24	75	126	57	108	49	1110	611	112
91	42	103	34	85	16	67	118	59	1210	711	212
101	52	113	44	95	26	77	128	69	110	811	312
111	62	123	54	105	36	87	18	79	210	911	412
121	72	13	64	115	46	97	28	89	310	1011	512

(b) 优化 TCT

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(c) 实际阴影分布

图4 对称阵列阴影分布
Fig. 4 Shadows distribution of symmetric array

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(a) TCT

11	62	113	54	105	46	97	38	89
21	72	13	64	115	56	107	48	99
31	82	23	74	15	66	117	58	109
41	92	33	84	25	76	17	68	119
51	102	43	94	35	86	27	78	19
61	112	53	104	45	96	37	88	29
71	12	63	114	55	106	47	98	39
81	22	73	14	65	116	57	108	49
91	32	83	24	75	16	67	118	59

(b) 优化 TCT

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(c) 实际阴影分布

图5 不对称阵列阴影分布

Fig. 5 Shadows distribution of asymmetric array

针对对称阵列的遮挡特性, 在不考虑温度变化时, 局部阴影下光伏组件的光生电流为:

$$I_{sc0} = \frac{G}{1000} I_{sc} \quad (1)$$

式中: I_{sc} 为标准测试条件下光伏组件短路电流。当流过被遮挡组件的电流大于其光生电流时, 组件被旁路二极管短路, 两端电压为旁路二极管导通压降的反压。由于二极管导通压降远小于阵列电压, 可不予以考虑。对于 SP 结构, 12 列组件遮挡状况一致, 每列有相同的工作状态。假设流经每列组件串的电流为 I , 在 STC 下组件光生电流约为短路电流 I_{sc} , 被遮挡组件的光生电流则为 $0.1I_{sc}$, 光伏组件的最大功率点电压为 V_{mpp} , 则 $0.1I_{sc} \leq I \leq I_{sc}$ 时, 局部最大功率约为:

$$P_a = I_{sc} \times 9V_{mpp} \quad (2)$$

当 $I \leq 0.1I_{sc}$, 局部最大功率约为:

$$P_a = 0.1I_{sc} \times 12V_{mpp} \quad (3)$$

则 SP 结构的光伏阵列全局最大功率约为:

$$P = 12 \times I_{sc} \times 9V_{mpp} = 108I_{sc}V_{mpp} \quad (4)$$

对于 TCT 结构, 每行组件并联连接, 则阵列行电流分别为:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = \\ I_7 &= I_8 = I_9 = 12I_{sc} \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_{10} = I_{11} = I_{12} = 1.2I_{sc} \quad (6)$$

流过阵列的电流为 $12I_{sc}$ 时, 第 10、11、12 行组件被旁路, 此时阵列电压约为 $9V_{mpp}$ 。而阵列电流为 $1.1I_{sc}$ 时, 阵列电压约为 $12V_{mpp}$, 因此, 全局最大功率约为 $108I_{sc}V_{mpp}$ 。

优化配置的 TCT 结构使得每行阴影均匀分布。每行电流 I 均为:

$$I = 9I_{sc} + 0.3I_{sc} = 9.3I_{sc} \quad (7)$$

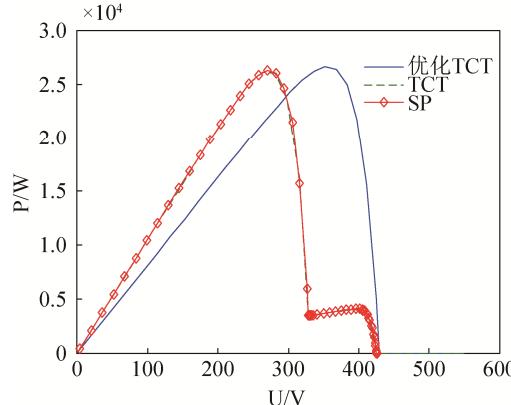


图 6 对称阵列 P-V 特性曲线
Fig. 6 PV curve of symmetric array

此时仅有全局最大功率点:

$$P_a = 9.3I_{sc} \times 12V_{mpp} = 111.6I_{sc}V_{mpp} \quad (8)$$

图 6 为 3 种结构的 P-V 特性曲线。对于不对称阵列的遮挡特性, 其分析方法与对称阵列相同。SP 结构和 TCT 结构的全局最大功率点皆为 $72I_{sc}V_{mpp}$, 优化配置后的 TCT 结构的全局最大功率略低于 SP、TCT 结构, 为 $69.3I_{sc}V_{mpp}$, 其原因是存在 3 个组件被遮挡、有 6 行存在 2 个组件被遮挡。但减小了局部最大功率点间的落差, 降低了最大功率点搜索的难度。图 7 为不对称阵列的 P-V 特性曲线。

2.1.2 不同阴影图案下性能分析

不对称阵列的短窄型阴影、长宽型阴影、长窄型阴影、对角线型阴影的分布如图 8(a)~(d)所示。对称型阵列的阴影分布如图 9(a)~(d)所示。

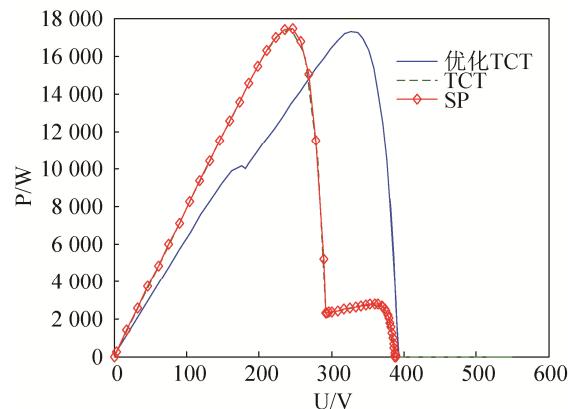


图 7 不对称阵列 P-V 特性曲线
Fig. 7 PV curve of asymmetric array

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

(a) 短窄型

(b) 长宽型

(c) 长窄型

(d) 对角线型

图 8 不对称阵列不同阴影图案分布图
Fig. 8 Shadows distribution of asymmetric array

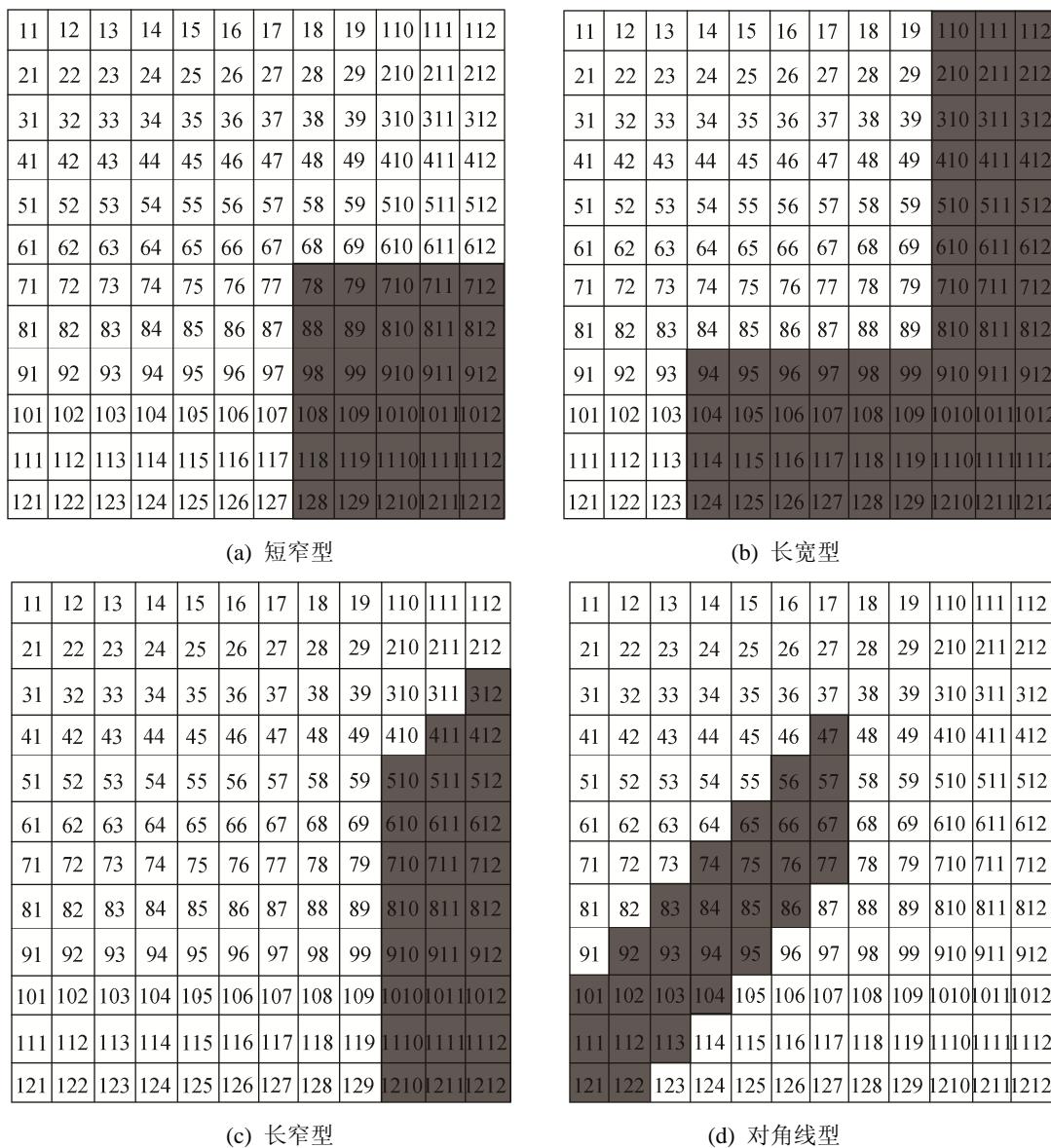


图9 对称阵列不同阴影图案分布图

Fig. 9 Shadows distribution of symmetric array

3种阵列不同阴影下最大功率点数据如表2~3所示。

表2 不对称阵列最大功率点			
Tab. 2 Maximum power point of asymmetric array			
类型	SP最大功率点/W	TCT最大功率点/W	优化TCT最大功率点/W
短宽型	17 450	17 450	17 256
短窄型	14 626	15 639	19 206
长宽型	12 698	12 329	13 448
长窄型	16 766	17 219	17 587
对角线型	15 399	14 813	13 894

表3 对称阵列最大功率点
Tab. 3 Maximum power point of symmetric array

类型	SP最大功率点/W	TCT最大功率点/W	优化TCT最大功率点/W
短宽型	23 581	23 205	25 226
短窄型	21 898	21 327	27 200
长宽型	18 631	17 389	20 307
长窄型	27 127	27 761	28 059
对角线型	24 533	26 251	28 238

由表2可知, 在不对称型阵列中, SP结构在对角线型下输出功率最高, 比TCT结构高2.4%,

比优化 TCT 结构高 6.2%。优化 TCT 结构在短窄型、长宽型、长窄型阴影下输出功率最高，分别比 SP 结构高 18.9%、3.1%、3.4%，比 TCT 结构高 14.7%、4.6%、1.5%。

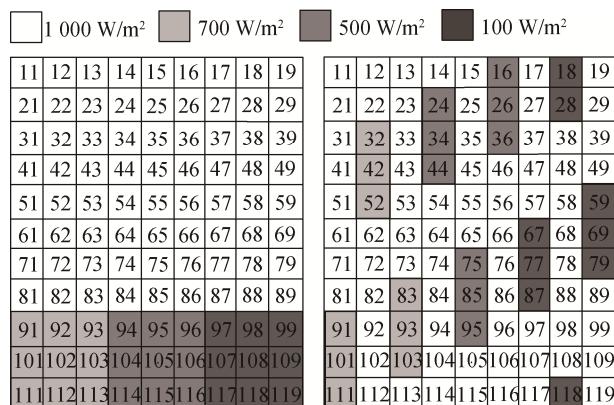
而在对称型阵列中，优化 TCT 结构在 5 种阴影图形下的输出功率皆最高。在短宽型、短窄型、长宽型、长窄型、对角线型的阴影下分别比 SP 结构高 4.7%、15%、4.8%、2.6%、10.5%，比 TCT 结构高 5.7%、16.6%、8.3%、0.8%、5.6%，如表 3 所示。

因此，相对于传统的 SP 结构、TCT 结构，优化 TCT 结构总体上能更好的削弱遮阴影响下的功率损耗，在大部分阴影场景下都有良好的功率提升。

2.2 辐照不均时光伏阵列输出性能

当光伏阵列上存在几种不同辐照度时，易导致多个局部最大功率点的出现，为分析阵列输出情况，设置了 5 种阴影图形。不对称阵列短宽型阴影如图 10 所示。短窄型、长宽型、长窄型、对角线型阴影的分布如图 11(a)~(d)所示。

对称型阵列的 5 种阴影图形见图 12。在此情况下，3 种结构的最大功率点分别如表 4~5 所示。



(a) 重构 TCT

(b) 优化 TCT 实际阴影分布

图 10 不对称阵列短宽型阴影分布图

Fig. 10 Short and wide shadow distribution of asymmetric array

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

(a) 短窄型

(b) 长宽型

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
101	102	103	104	105	106	107	108	109
111	112	113	114	115	116	117	118	119

(c) 长窄型

(d) 对角线型

图 11 不对称阵列阴影分布图

Fig. 11 Shadows distribution of asymmetric array

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(a) 短宽型

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(b) 短窄型

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(c) 长宽型

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(d) 长窄型

11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210	211	212
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310	311	312
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410	411	412
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510	511	512
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610	611	612
71	72	73	74	75	76	77	78	79	710	711	712
81	82	83	84	85	86	87	88	89	810	811	812
91	92	93	94	95	96	97	98	99	910	911	912
101	102	103	104	105	106	107	108	109	1010	1011	1012
111	112	113	114	115	116	117	118	119	1110	1111	1112
121	122	123	124	125	126	127	128	129	1210	1211	1212

(e) 对角线

图 12 对称阵列阴影分布图
Fig. 12 Shadows distribution of symmetric array

表 4 不对称阵列最大功率点

Tab. 4 Maximum power point of asymmetric array

类型	SP 最大功率点/W	TCT 最大功率点/W	优化 TCT 最大功率点/W
短宽型	17 492	17 470	19 351
短窄型	17 585	16 345	20 379
长宽型	15 008	15 027	15 810
长窄型	16 919	18 319	19 569
对角线型	15 399	15 831	17 119

表 5 对称阵列最大功率点

Tab. 5 Maximum power point of symmetric array

类型	SP 最大功率点/W	TCT 最大功率点/W	优化 TCT 最大功率点/W
短宽型	23 527	23 206	28 343
短窄型	26 385	25 050	30 166
长宽型	19 365	18 140	22 622
长窄型	27 452	29 234	30 557
对角线型	24 534	28 474	30 164

由表 4~5 可知, 当光伏阵列上存在渐变的辐照度时, 优化 TCT 配置的光伏阵列输出功率总是最高。不对称光伏阵列在短宽型阴影下, 优化 TCT 结构输出功率分别高于 SP、TCT 结构 7.7%、7.8%, 短窄型阴影下分别高 11.5%、16.6%, 长宽型阴影下分别高 3.3%、3.2%, 长窄型阴影下分别高 10.9%、5.2%, 对角线型阴影下分别高 7.1%、5.3%。

对称光伏阵列在短宽型阴影下, 优化 TCT 结

构输出功率分别高于 SP、TCT 结构 13.7%、14.6%，短窄型阴影下分别高 10.7%、14.5%，长宽型阴影下高 9.2%、12.7%，长窄型阴影下分别高 8.8%、3.8%，对角线型阴影下分别高 16.0%、4.8%。因此，优化配置的 TCT 结构更适合于多辐照度的光伏阵列。

3 结论

围绕阴影下不同阵列结构的输出性能进行研究，在 5 种阴影模式下，针对传统 SP 结构、TCT 结构和优化 TCT 结构的光伏阵列输出能力进行了详细的分析，同时利用 Matlab/Simulink 软件进行了仿真。结果表明：对于建筑物造成的辐照度单一的阴影，采用优化 TCT 结构的光伏阵列性能整体上有较好的提升，对于云层、树木等造成的连续渐变的阴影，无论是对称光伏阵列还是不对称光伏阵列，采用优化 TCT 结构比传统的 SP 结构和 TCT 结构输出的功率更高。

参考文献：

- [1] 丁明, 陈中. 遮阴影响下的光伏阵列结构研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 1-5.
Ding Ming, Chen Zhong. Reconfiguration of partially shaded photovoltaic array[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2011, 31(10): 1-5.
- [2] PICAULT D, RAISON B, BACHA S, et al. Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses: a case study[C]// International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2010: 37-40.
- [3] 丁坤, 王祥, 徐俊伟, 等. 常见光伏阵列拓扑结构分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(3): 114-118.
Ding Kun, Wang Xiang, Xu Junwei, et al. Topological Analysis of Common PV Arrays[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 114-118.
- [4] Cheng Ze, Pang Zhichao, Liu Yanli, et al. An adaptive solar photovoltaic array reconfiguration method based on fuzzy Control[C]// Proceedings of the 8th WCICA , 2010: 176-181.
- [5] 李锐华, 闫宇星, 胡波. 阴影遮蔽条件下光伏阵列的可重构优化配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 38-44.
Li Ruihua, Yan Yuxing, Hu bo. Reconfigurable optimization arrangement method of photovoltaic arrays in partial shade condition[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(7): 38-44.
- [6] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
Sun Ziyong, Yu hang, Yan Gangui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [7] Rani B I, Ilango G S, Nagamani C. Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration[J]. IEEE Trans. Sustain Energy (S1949-3029), 2013, 4(3): 594-601.
- [8] Sahu H S, Nayak S K. Extraction of maximum power from a PV array under nonuniform irradiation condition, IEEE Transactions on Electron Devices (S0018-9383), 2016, 63(12): 4825-4831.
- [9] Sahu H S, Nayak S K. Power enhancement of partially shaded PV array by using a novel approach for shade dispersion[C]// Innovative smart grid technologies Asia (ISGT Asia), 2014: 498-503.
- [10] 蒋建东, 花京东, 李鲁霞. 分布式光伏阵列重构拓扑及控制方法[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 343-348.
Jiang Jiandong, Hua Jinghua, Li Luxia. Reconfigure topology and control strategy of distribute photovoltaic array[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(3): 343-348.