并网光伏电站电磁暂态建模及其特性研究

罗美玲^{1,2}, 谢海滨²

(1. 华北电力大学,北京 102206;2. 国网宁夏电力公司,宁夏 银川 750001)

摘 要: 针对宁夏地区某光伏电站并网情况,利用实时数字仿真仪 RTDS 对光伏发电系统控制模型及电磁暂态特性进行了分析与研究,并结合宁夏电网进行了建模验证及仿真计算。结果 表明:光伏电站受到逆变器容量限制,故障电流一般不超过最大额定电流的1.1~1.3 倍,不对称 故障下光伏电站的故障电流以正序量为主,含少量的负序和畸变。

关键词: 光伏电站; 电磁暂态; 故障特性

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1672-3643(2014)01-0012-07 有效访问地址: http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2014.01.003

Photovoltaic power station electromagnetic transient model and its features LUO Meiling^{1,2}, XIE Haibin²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2.State Grid Ningxia Electric Power Company, Ningxia Yinchuan 750001, China)

Abstract: Aiming at a case of solar power photovoltaic plant in Ningxia started generation and connected to the grid, analyzes and researches the control model and the electromagnetic transient characteristics of photovoltaic power generation system using real-time digital simulation (RTDS) software, combining with Ningxia power grid, makes model verification and simulation calculation. The results show that the photovoltaic power plant is limited by the inverter capacity, fault current is generally not more than 1.1 to 1.3 times of the maximum rated current, when the asymmetric fault, fault current has mainly in positive sequence amount, containing little negative sequence and distortion.

Key words: photovoltaic power plant; electromagnetic transient; fault characteristic **DOI**: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.01.003

收稿日期:2013-10-12

作者简介:罗美玲(1982),女,工程师,从事继电保护整定计算工作。

随着煤炭等常规资源的短缺及其导致的环 境问题加剧,大力开发利用可再生新能源是保障 能源安全、优化能源结构、保护生态环境、减少温 室气体排放的重要措施,太阳能发电技术的发展 和利用规模呈现加速发展趋势。近年来,关于光 伏电站的建模研究很多^[1-3],而针对接入实际电网 的光伏电站在各种故障情况下的电磁暂态的研 究很少。

本文利用实时数字仿真仪(Real Time Digital Simulator, RTDS)^[4-5], 以宁夏某实际光伏电站及其 接入电网的局部结构为背景,搭建仿真模型并针 对典型的对称故障和非对称故障进行仿真,分析 光伏发电系统故障的暂态特性。

1 光伏电站建模

1.1 光伏组件建模

光伏电池的建模方法基于其物理机制^[6-8],此 法可以更准确地反应光伏阵列的物理特性和物 理本质,仿真的精确度较高,可满足微秒级电磁 暂态仿真需要。光伏电池组件的等效电路如图 1 所示。



图 人阳能电池组件的等效电路

众多太阳能光伏电池组件串联后形成光伏电 池阵列,俗称 PV 阵列。PV 阵列的总输出电流是组 件电流乘以并联个数 N_P。

选择不同的光照强度和环境温度,建立光伏 电池物理机制模型。

光伏阵列的特性通常通过绘制阵列的输出电流 I 对终端电压 V 即 I-V 特性曲线来描述,如图2 所示。环境温度和光照强度都会影响该特性曲线,如图 3所示。



1.2 光伏控制器建模

光伏控制器通常包括最大功率跟踪控制和并 网逆变控制。最大功率跟踪控制是为了实现在不 同环境下光电的最大转换效率。

1.2.1 最大功率跟踪控制

为了在光照和温度等工作条件变化的情况下 最大限度地输出更多的功率,尽可能提高光伏电 池的效率,就需要解决太阳能光伏阵列的最大功 率点跟踪(Maximum Power Point Tracking,MPPT) 问题^[9-12]。MPPT 的目的就是在光照和温度等工作 条件变化的情况下改变阵列的输出电压使其工作 在最大功率点处。

增量电导法是通过比较太阳能光伏阵列的 瞬时导纳与导纳变化率来实现最大功率点跟 踪,具有良好的跟踪性能,在多种 MPPT 算法中 是精确度最高的。光伏电池阵列的输出功率和输 出电压在不同温度下的关系,即 P-V 曲线,如图4 所示。



从光伏电池阵列的 P-V 曲线可以看出,功率 最大值处的曲线斜率为零。即 dP =0。将功率转换 为 PV 阵列端口测得的电压电流之积,该表达式可 写为:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$
(1)

等式(1)两边同时乘以dV,可得

$$dP=V \cdot dI+I \cdot dV$$
 (2)

当电压在采样点和下一采样点相同时(dV=0),等式(2)可以简化为

$$dP=V \cdot dI \tag{3}$$

从这个等式中可以推导出当电压为正常 数时,输出功率的增大总是伴随着输出电流的 增大。

1.2.2 并网控制

并网逆变控制是将光伏电池发出的直流电能 转换成符合电网要求的交流电。逆变器的控制采 用基于电网侧电压定向的向量控制方案,实现光 伏网侧与电网之间传输的有功功率和无功功率的 解耦控制,主要用于稳定直流母线的电压和控制 网侧变流器与电网的无功功率交换,如图5所示。 其控制目标为:



(1)保持直流电压为恒定值;

(2)控制电网侧变流器与电网交换的无功功 率为设定值。

设并网变流器通过阻抗为 R+jω₁L 的线路并 入电网,则可写出电压方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{sa} \\ \mathbf{u}_{sb} \\ \mathbf{u}_{sc} \end{bmatrix} = (\mathbf{R} + \mathbf{j}\omega_{1}\mathbf{L}) \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{a} \\ \mathbf{i}_{b} \\ \mathbf{i}_{c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{a1} \\ \mathbf{u}_{b1} \\ \mathbf{u}_{c1} \end{bmatrix}$$
(4)

dq 坐标系统下电压方程转化为

$$\begin{cases} u_{sd} = (R + j\omega_1 L)i_d - \omega_1 Li_q + ud_1 \\ u_{sd} = (R + j\omega_1 L)i_d - \omega_1 Li_q + ud_1 \end{cases}$$
(5)

推导可得

$$\mathbf{u}_{sd} = \mathbf{R}\mathbf{i}_{d} + L\frac{d\mathbf{I}_{d}}{dt} - \omega \mathbf{L}\mathbf{i}_{q} + \mathbf{e}_{d}$$
 (6)

$$\mathbf{u}_{sq} = \mathbf{R}\mathbf{i}_{q} + L\frac{d\mathbf{I}_{q}}{dt} + \omega \mathbf{L}\mathbf{i}_{d}$$
(7)

在式(6)中右边的前两项是实现电压、电流解 耦控制的解耦项,后两项是实现解耦控制的补偿 项。在式(7)中右边的前两部分是实现电压、电流 解耦控制的解耦项,第三项是实现解耦控制的补 偿项。

2 模型等值及验证

根据宁夏某实际光伏电站的实际接线情况, 按照上述方法搭建了该电站的详细模型,但由于 系统庞大,基本无法进行仿真计算。因此,将该系 统部分元件进行等值建模并验证。

该电站装机容量为 30 MW,总共包含 60 个容 量为 0.5 MW 的逆变器和 30 个容量为 1 000 kVA 的升压变压器。

按照以上分析,将该光伏电站等效为如图 6 所示的等值电路。

对该光伏电站等值建模后,在 RTDS 上进行 仿真计算验证,结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,等值模型的直流电压输出 基本与实际模型一致,表明等值模型的内电势和 实际模型的内电势一致。该仿真结果验证了等值 方法的有效性。



3 光伏发电系统电磁暂态分析

按照上述的光伏电站建模方法,以宁夏某实

际光伏电站及其接入电网的局部结构为背景,在 RTDS上搭建如图 8 所示的仿真模型开展电磁暂 态计算,分析光伏发电系统故障特征。

光伏发电系统暂态特性完全取决与逆变器在



故障期间的控制策略。这里以含低电压穿越能力, 故障期间控制策略为恒功率+电流上限为例进行 故障分析。

3.1 光伏发电系统对称故障

光伏系统 35 kV 送出线 k1 点发生经 0.2 Ω 的三相故障,故障持续 0.2 s 光伏电站的输出特性,故障前光照强度为 800 W/m²,故障期间认为不 变。结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在 35 kV 送出线故障时,光 伏电站并网点电压跌落较深,光伏电站提供的故 障电流已达到光伏电站自身容量的限制。故障期 间光伏电站发出的有功功率有所下降,无功功率 基本维持不变。在这种情况下,光伏电站在故障期 间可等效为一恒电流源,相位与故障期间的并网 点电压同相。

图 10 给出了 110 kV 负荷线 k2 点发生经 5 Ω 三相故障,故障持续 0.2 s 光伏电站的输出特 性,故障前光照强度为 800 W/m²,故障期间认为 不变。

由图 10 可以看出,在故障离光伏电站的电气 距离较远时,光伏电站并网点(图 8 所示的 A 点) 电压跌落较小,光伏电站提供的故障电流未达到



《宁夏电力》2014年第1期

光伏电站自身容量的限制。该情况下光伏电站在 故障期间的特性可用恒功率源来表示。功率大小 可认为与故障前一致。

3.2 光伏发电系统不对称故障

系统发生不对称故障时,光伏电站出口电压 包含负序和零序分量,光伏电站的输出特性也与 对称故障不同。

35 kV 送出线 k1 点发生 BC 两相接地故障, 故障持续 0.2 s,故障前光照强度为 800 W/m²,故 障期间认为不变,光伏电站的输出特性如图 11 所示。

与传统同步电机不同,光伏电站在外部电网 发生不对称故障时发出的故障电流依然为对称的 三相正序电流,只有略微的不平衡和畸变。由图 11 可以看出,故障期间电流已经达到光伏电站的 容量限制,且基本为正序量。故障期间并网点(图 8 所示的 A 点)电压不对称,U_A可分解为正序、负 序和零序;零序电压与正序电流的乘积得到的三 相瞬时功率为 0,负序电压与正序电流乘积得到的 三相瞬时功率为一个 2 倍工频的波动量。图 11 的 功率图可以明显验证上述分析。故障电流的序分 量如图 12 所示。

当 110 kV 负荷出线 k2 点发生 A 相接地故障,故障持续 0.2 s,故障前光照强度为 800 W/m²,故障期间认为不变,光伏电站的输出特性如图 13 所示。



图 11 35 kV 送出线两相接地故障时光伏电站响应



图 12 故章电流的序分量





从图 13 中可看出,故障期间光伏电站提供的 故障电流以正序分量为主,光伏电站输出的功率 为与故障前功率相同的一固定值叠加一个 2 倍频 的波动值。

4 结论

(1)针对宁夏某光伏电站及接入电网的实际 结构,进行了光伏电站的电磁暂态分析和等值建 模,采用增量电导法进行最大功率跟踪控制,实现 了光电转换效率的最大化;利用电网侧变频器电 压定向的矢量控制方案实现了电网侧变频器与电 网之间传输的有功、无功的解耦控制,并验证了模 型的正确性。

(2)光伏电站三相短路及单相短路的故障情 形下的电磁暂态特征表明,光伏电站受到逆变器 容量限制,故障电流一般不超过最大额定电流的 1.1~1.3 倍,不对称故障下光伏电站的故障电流以 正序量为主,含少量的负序和畸变。

(3)本文研究结论对今后研究光伏电站等分 布式电源广泛接入交流电网的电磁暂态影响提供 了参考依据,对进一步研究电力系统与光伏电站 相互影响造成的继电保护误动和拒动机理提供了 技术支撑。

参考文献:

- [1] 陆源,张兆云.光伏发电系统仿真研究[J].电气技术, 2013(8):1-6,15.
- [2] 刘光亚,康璐.光伏发电系统的建模[J].湖北工业大学 学报,2013(2):19-22,30.
- [3] 张慧慧,朱晓荣.光伏并网系统的建模与控制研究[J].陕西电力,2013,41(5):17-20,33.
- [4] 郑飞,张军军,丁明昌.基于 RTDS 的光伏发电系统低 电压穿越建模与控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(22):19-23.
- [5] 苏丽萍,陈侃,李国杰,金之俭.基于 RTDS 的光伏并 网系统实时仿真平台研究,电力系统保护与控制[J], 2012,40(15):110-115.
- [6] 张鹏,光伏电池模型特性研究[J],科学技术与工程, 2013,23:6907-6909,6922.
- [7] 许盛之,赵庚申,王庆章,等.太阳电池及方阵的模型 与仿真[J].太阳能学报,2006,27(10):979-981.
- [8] 周德佳,赵争鸣,吴理博,等.基于仿真模型的太阳能 光伏电池阵列特性的分析[J].清华大学学报(自然 科学版),2007,47(7):1109-1112.
- [9] 杨永恒,周克亮.光伏电池建模及 MTTP 控制策略[J]. 电工技术学报,2011,26(9):229-234.
- [10] 陈卉,王明春.独立光伏发电系统的最大功率跟踪研 究[J],发电设备,2013,27(5):326-329.
- [11] 黄灿英,陈艳,李升健.一种应用于光伏系统的 MPPT 算法设计及仿真[J].自动化应用,2013,7:72-73,108.
- [12] 张亦斌,魏婷,周倩.光伏发电并网系统变步长 MPPT
 及电压控制策略仿真研究[J].南方电网技术,2013,7
 (6):67-70.