

# 分布式电源故障分析和保护控制设计

陈城华 黄奕联 刘宇威 徐力 蔡梓成

北京师范大学珠海分校工程技术学院 广东省 珠海市 519000

**【摘要】**通过对于不同的控制方式下分布式电源（简称：DG）以及不对称故障特性的分析，并以此为基础设计一个具低电压穿越（简称：LVRT）的微机保护系统，可以实现不同情况下的含有分布式电源的电网的保护功能，尤其是发生不对称故障时。目前基于多点信息的保护系统需要实时采集系统的各种电气信息，信息量巨大，成本高。尤其是不对称故障时，逆变型分布式电源（简称：IIDG）向系统注入负序电流，极大的影响了故障电流的特性。通过消除负序电流，提取准确的正序分量以保证保护的正确动作，同时在故障发生时向系统输出无功电流支撑系统电压，实现了保护功能同时满足国家电网对于分布式电源并网的要求<sup>[1]</sup>。

**【关键词】**分布式电源；短路故障；闭环控制

## 1 引言

分布式发电是指利用各种分散的能源发电供负荷使用或者接入电网中，分布式电网作为传统集中发电的有效补充。目前的发展正在日益成熟，可以灵活的切换运行模式，既能并网也能脱离电网单独运行。分布式能源主要使用的是清洁能源，在全球环境恶化和资源短缺的今天，发展分布式电源有利于促进清洁能源的发展，由于分布式发电具有双向性，能够有效提高能源的利用率。减少负荷对于单一供电的依赖性，提高供电的可靠性<sup>[2]</sup>。

随着国家大力推进分布式能源的发展，分布式电源接入的电网的容量日益增加<sup>[3]</sup>，分布式电源在电网中的渗透率提高，因此当分布式电源发生短路故障时就会给电网的运行带来极大的影响，分布式电源的保护成为制约分布式电源发展的重要因素。而当分布式电源大量接入电网时，传统电网的故障特性发生改变，电网结构发生改变，使得传统的故障电流分析方法和继电保护装置不在适用。因此需要研究 PQ 控制下的分布式电源在对称和不对称的故障下的故障特性，并以此为基础设计出具有保护和低压穿越能力的保护控制系统。

## 2 发展现状

目前主流供电方式仍是以大容量机组和高电压等特征的集中式的发、输、配，但集中式的供电模式不能实时地、精准地追踪负荷端变化，若为了应对短时地负荷峰值而增加发电机组或更改发电计划会损耗大量资源。而分布式电源则具有较高的灵活性，在负荷峰值时可以接入电网应对荷峰，提高经济效益。

随着 DG 接入电网的容量不断增加，渗透率升高，对于 DG 的故障保护的研究变得尤为重要，国内外对于保护的研究主要基于以下几个方面：

1. 改进传统的继电保护。
2. 基于通讯网络的保护系统。

### 2.1 国外发展现状

IEEE Transactions on power system 中关于分布式电源的控制保护主要有：

1. 根据微电网的供电范围，利用导引线作为通讯方式的 PMU 保护系统。
2. 结合实时通信技术为馈线电流的差动保护。
3. 以微电网多点信息构成的自适应保护，以上的保护都是目前比较成熟的保护系统，同时考虑了保护和满足并网要求，大部分研究只考虑保护功能或者满足 LVRT 功能。

### 2.2 国内发展现状

我国的分布式发电虽然起步晚，但是随着国家政策的推动，我国的新能源发电正在快速的发展，到 2015 年我国的装机容量达到 45GW 成为全世界第一<sup>[4]</sup>，随着分布式电源接入电网容量的增加，关于 DG 的保护也在快速的发展，国内的学者们的研究成果主要有：

1. 基于 IIDG 的反时限低阻抗保护。
2. 通过分析不同位置处的短路点的正序电压和电流而提出的自适应正序电流速断保护。
3. 利用线路的母线的电压信息的纵联差动保护。
4. 基于多 Agent 的通讯保护系统。
5. 基于 IEC61850 规约中的 MMS 服务获取 IIDG 的功率参考值的保护控制系统。

### 3 分布式能源发生短路故障时故障电流的故障特性

#### 3.1 分布式能源的控制

分布式电源的控制分为 PQ, Vf 等控制, 不同控制方式的特性不同, 可以通过在 MATLAB 中仿真不同控制方式下的故障情况, 比较两种故障特性, 为设计保护控制系统做准备。

李令仪中通过 MATLAB/Simulink 为 PQ 控制法进行仿真总结出 PQ 控制法在确保系统快速达到稳定的同时, 有着高响应速度和小波动的优点, 且响应过程中电压值 U 与频率 f 不受到外界影响<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 DG 对称短路故障

当电网接入分布式电源时, 电网将从单点辐射结构变为多点辐射, 故障的电流的大小和方向都发生改变, 传统的故障电流特性改变。并且不在取决于系统的阻抗, 基于以上两点, 需要对于含有 IIDG 的配电网的对称故障特性进行分析。

洪叶研模拟 DG 电源接入电网不同线路发生故障的情况, 得出 DG 电源短路会影响继电保护装置的可靠性, 不能可靠的动作。以及造成重合闸无法动作并且在非同期下的冲击电流会毁坏装置, 对系统造成危害<sup>[6]</sup>。

#### 3.3 DG 不对称短路故障

当发生不对称短路故障时, 此时 IIDG 输出不止有正序分量, 还有负序分量, PI 调节器只能实现在正序情况下的无差调节, 通过对称分量法将故障电流分解成正序, 负序分量。在 dq 变换的情况下, 负序分量变成二倍频的分量。此时区分开负序分量和直流正序分量, 通过带通滤波的原理, 将负序电流消除, 同时可以提取出正序分量。

周念成等人采用 PSCAD/EMTDC 分析了 IIDG 不同的短路故障下短路电流与其他参数的关系, 针对不对称故障的情况需要特别消除 IIDG 注入电网的短路电流负序分量, 若不消除短路电流负序分量, 电压会持续上升, 在消除后出现小幅度下降<sup>[7]</sup>。

#### 3.4 MATLAB 建模

在需要着重研究短路故障时候的暂态变化和对于保护的控方法情况下, MATLAB 拥有短路故障模块和较多的控制模块以及数学函数, 对于故障情况的建模和分析, 以及控制系统的搭建有着极大的便利, 但是 MATLAB 的运算步长较大, IIDG 短路响应时间比较短, 需要以几毫米的步长计算, 这意味着一个周期的仿真需要很长的运算时间。

#### 3.5 ANSYS 建模

ANSYS 的计算步长可以达到几微秒也可以达到

几秒, 不管是对于传统电网还是对于响应时间短的含有 IIDG 的电网的仿真, ANSYS 都可以满足。相对于 MATLAB, 可以更加精确的反应含有 IIDG 的电网短路时的暂态波动, 便于分析短路故障时的暂态变化情况。

#### 3.6 DSP 在 DG 短路故障的应用

DSP 全称为数字信号处理, 通过数模转换器能够将收集电流电压等模拟量转换成数字量输入数字信号处理器进行处理, 监测并调整参数。

分布式电源的微机保护在保护的基础上还需要能够输出无功电流, 将故障发生时提取的故障量通过 DSP 的数模转换模块转换为数字信号, 并且控制有功电流, 输出无功电流, 从而实现预想的系统功能。

### 4 系统设计思路

通过对于 PQ 控制的光伏发电为电源的微电网系统进行分析, 总结光伏电源的分别在对称和不对称故障中的故障特性, 可以运用对称分量法和派克变化(dq 变换)对不对称故障电流进行分析。dq 变化有着容易分离基波以及多次谐波和能够较好的消除谐波、不对称电流的影响。搭建一个微机保护系统, 通过电流功率双闭环控制和信道通信保护机制, 实现保护准确快速的动作, 确保保护的选择性, 同时在故障发生时输出无功电流支撑电网电压。主要原理如下:

$$\begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha \\ -\cos\alpha & -\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

公式 1

将故障电流通过 dq 变换, 变成 Id 和 Iq 分量, 输出功率为:

$$\begin{bmatrix} P \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega I^d \\ \Omega I^q \end{bmatrix}$$

公式 2

双闭环控制原理图如下:

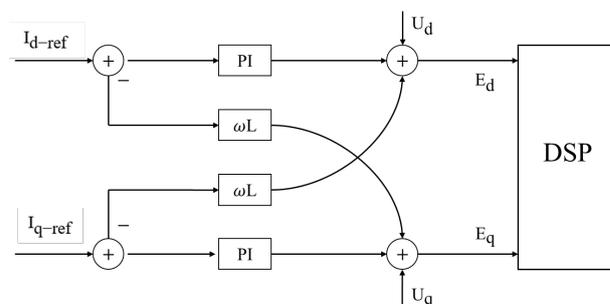


图 1 双闭环控制示意图

其中比例积分调节器 (PI 调节器) 可以实现 Id 的无差控制同时跟踪基准电流。

DG 电流进行 dq 变换后, 电流 I 在 d 轴的分量为  $I_{d-ref}$ , 有功部分通过 PI 调节器转化为有功电压, 电流 I 在 q 轴的分量为  $I_{q-ref}$  同样的无功部分则经过相应变化转化为 d 轴上无功电压分量, d 轴上的外电路电压是  $U_d$ , 三个电压分量的矢量和是 d 轴的电动势  $E_d$ 。DG 电流在 q 轴上也经过相同变化得到 q 轴的电动势  $E_q$ 。电动势  $E_d$  和  $E_q$  经数模转换后输入 DSP 进行数据处理, 并且控制有功电流, 输出无功电流, 从而实现预想的系统功能。

双闭环控制系统引用了 PI 调节器, 是定型的反馈调节, 能够实时监测误差并迅速做出调整, 从而实现系统自动且精准的控制。而双闭环控制在此基础上能够更进一步提升系统的响应速度。双闭环控制系统能够消除负序电流, 将不对成故障分量经过基于 dq 变化的双闭环变化后通过数模转换变成数字信号控制保护正确动作, 能够降低误动作的发生概率。

目前大部分的保护装置只考虑了保护没有考虑到并网要求, 可以采用限制有功电流的控制, 在故障时输出无功电流以支撑系统电压<sup>[8]</sup>, 为研究人员提供一种思路。

## 5 结论

分布式电源与集中式大容量供电相结合逐渐成为趋势, 但分布式电源并网会改变原有电网拓扑结构, 电流、电压等矢量参数方向大小都会发生改变。当 GS 发生不对称短路时, 其负序电流分量会影响继电保护装置和重合闸的可靠性。总结分析 DG 的短路故障特点和常用的相关仿真软件的优缺点, 着重研究控制系统方面, 设计了双闭环控制的微机保护系统。当 GS 发生不对成短路时, 双闭环控制将不对成故障分量中的负序电流分

量, 再通过数模转换变成数字信号经 DSP 处理后控制相应保护正确动作, 降低误动、拒动的发生概率, 提高电网运行稳定性。

## 【参考文献】

- [1] 曾德辉, 王钢, 郭敬梅, 孙迅雷. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 86-92.
- [2] 范佳莹. 基于多目标改进人工搜索群算法的分布式电源优化配置 [D]. 河北工业大学, 2017.
- [3] 刘扬洋. 风险管理下的虚拟电厂优化调度和竞价策略研究 [D]. 上海交通大学, 2016.
- [4] 陈波, 李果, 杨胜辉, 苏楚研. 新能源发电与电能质量问题浅析 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(06): 91-96.
- [5] 李令仪. 微电网并网运行模式下的控制方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2019(14): 132-133.
- [6] 洪叶. 分布式电源并网对继电保护的影响研究 [J]. 电气开关, 2020, 58(02): 41-45.
- [7] 周念成, 叶玲, 王强钢, 谢开贵. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49+8.
- [8] 罗劲松. 大型光伏电站低电压穿越技术研究 [D]. 宁夏大学, 2014.