第 41 卷　第 24 期　2017 年 12 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20170609003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.24 Dec.25，2017

含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题

彭　克，张　聪，徐丙垠，陈　羽，陈佳佳，赵学深
（山东理工大学电气与电子工程学院，山东省淄博市 255000）

摘要：未来配电网的架构将具备分布式电源高密度接入、交直流混联等显著特点，配电网故障分析将面临新的挑战，高密度分布式电源及大量电力电子设备的接入，使得故障响应呈现非线性时空关联特性，交直流系统故障响应交互影响进一步加大了故障分析的难度。文中对配电网故障分析的研究现状进行了总结，进一步指出高密度分布式电源的时空关联特性解析与解耦建模、交直流配电系统的等效建模以及高效收敛的计算方法是未来配电网故障分析亟待探索的关键问题。

关键词：分布式电源；电力电子；交直流配电网；故障分析

0　引言

石油、煤炭等传统能源的日渐枯竭以及环境污染的日益加剧，使得开发利用新能源和可再生能源成为中国经济可持续发展的迫切需求。中国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中明确提出了“可再生能源低成本规模化开发利用”的要求，近日国家能源局发布的《可再生能源“十三五”发展规划》指出，到 2020 年和2030 年实现非化石能源占一次能源消费比重 15%和 20%的目标，加快建立清洁低碳的现代能源体系，促进可再生能源产业持续健康发展，到 2020 年底，全国太阳能发电并网装机确保实现 1.1 亿 kW 以上，风力发电达到 2.1 亿 kW 以上。作为节能减排、解决全球气候变暖以及实现可持续发展的重要技术措施，分布式发电（DG）技术在世界范围内迅速发展，越来越多的分布式电源通过电力电子设备接入配电网，正给电力技术带来一场深刻的变革，配电网的结构与属性发生了重大变化，未来新能源和可再生能源的利用将更多的通过分布式发电的方式，以多点、分散、密集的高密度形式接入配电网，并在配用电领域中扮演越来越重要的角色。分布式电源在不断满足电网能量需求的同时，也将带动电力电子技术和产品在配电网中的大量配置和使用。

此外，随着交流电网规模的扩大以及电压等级的提高，交流互联电网的短路容量不断增大，其运行控制愈发复杂，系统的安全稳定问题越来越严重。同时，面对电动汽车、分布式电源（如光伏）和 LED 照明等直流设备的大规模接入，交流电网较多的电能变换环节导致供配电的效率受到影响。近年来的研究成果表明，基于柔性直流技术的交直流混合配电网更适合现代城市配电网的发展，交直流混合配电网可以更好地接纳直流分布式电源和负荷，缓解城市电网站点走廊有限与负荷密度高的矛盾，提高系统安全稳定水平并降低损耗。因此，交直流混合配电网是未来配电网的一个重要发展趋势，可以有效提升城市配电系统的电能质量、可靠性与运行效率[1-2]。

可以预见，配电网的故障特征将出现本质上的变化，而配电网的故障规律与特征是研究配电网继电保护与配电网自动化故障处理技术的基础，不仅可以为故障诊断、快速定位和继电保护等技术的发展提供理论依据，也可以为配电网的设备选型、安全运行评估以及规划设计提供技术支持，因此在配电网故障分析的关键理论与技术方面亟待开展更为深入的研究与探索。

1　配电网典型特征与挑战

未来配电网的架构将具备交直流混联、分布式电源高密度接入等显著特点，图 1 给出了一个基本架构示意[3]。

1）大量具有随机性和间歇性的分布式电源高密度接入，尤其以分布式光伏等逆变型分布式电源居多，在中高压配电网络中低电压穿越的要求使得并网运行特性尤为复杂。同时交直流微电网[4]、虚拟电厂[5]等新型网络组态的出现，使得配电网由单一

收稿日期：2017-06-09；修回日期：2017-09-18。
上网日期：2017-11-20。
国家重点研发计划资助项目（2016YFB0900605）；山东省自然科学基金资助项目（ZR2017LEE022）。

的受端网络成为具备自治能力的单元控制区域。

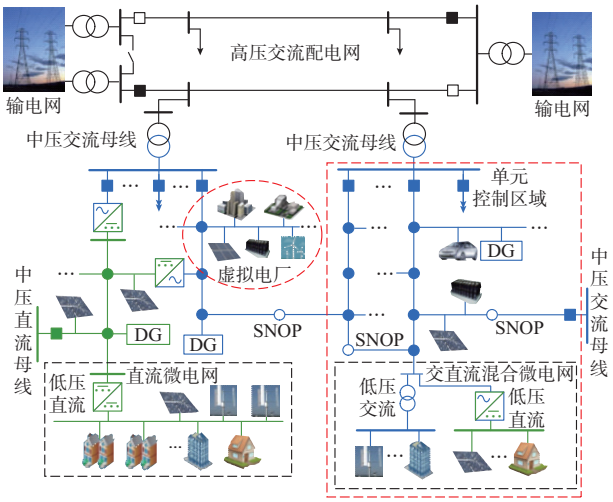

图 1　未来配电网典型构架

Fig.1　Typical framework of the future distribution system

2）交直流系统多端互联，网络结构和运行方式更加灵活多变。直流系统通过 DC/DC 变换装置等可实现不同电压等级之间的互联，DC/AC 换流器灵活的控制方式可以实现交直流潮流的相互转供，有利于系统的可靠稳定运行，未来的智能配电网将会是一个交直流全面混联的复杂系统，一方面可与上层交直流混合输电体系相协调，另一方面可就地接入直流分布式电源与负荷，满足配电网的直流源荷接入需求。

3）智能软开关装置（SNOP）、DFACTS（distribution flexible AC transmission systems）等大量电力电子器件接入。电力电子技术的发展涌现出许多新型配电装备，其中较为受关注的是 SNOP 和 DFACTS 装置。SNOP 可以代替传统的联络开关实现闭环运行，解决了传统联络开关的合环冲击电流问题，同时还可实现一侧系统故障时的可靠供电[6]。DFACTS 技术是柔性交流输电（FACTS）技术在配电系统中的延伸应用，通常与分布式电源或者负荷连接解决电压质量问题[7]，以其快速的响应特性和灵活的控制手段受到了国内外学者的高度重视。

配电网的复杂结构，尤其是大量逆变型分布式电源以及电力电子设备的接入，使得配电网的故障时空关联特性呈现典型非线性受控特点，对传统的故障分析方法提出了新的挑战。

1）分布式电源等值模型难以定性建模，尤其高密度逆变型分布式电源接入后，其故障特性取决于控制策略，在低电压穿越控制下故障电流特性更为复杂，要求电压跌落超过 10%时，每 1%的电压跌落，逆变器至少要提供 2%的无功电流，且响应速度应在 20 ms 之内[8]。因此根据电压跌落的不同，分布式电源具有恒功率、故障穿越以及脱网等不同的输出模式，一方面分布式电源不同的输出模式对电压具有不同的支撑作用，另一方面不同的故障点使得分布式电源接入点的电压跌落程度不同，尤其高密度接入时彼此之间相互影响，逆变型分布式电源在不同时间段的出力特性、不同故障点电压跌落程度以及低电压穿越控制下的不同输出模式，使得故障响应以及电气量分布呈现高维度非线性时空关联特性，故障电流难以定性分析与建模，故障计算等值模型已无法用简单的电压源或者电流源描述[9]。

2）交直流混联网络故障响应交互影响，故障特性难以量化分析。直流配电系统根据直流侧的极性布置情况可分为单极系统与双极系统，以双极运行较为常见，其极间故障是最为严重的故障，不仅造成直流侧电压急剧下降，也会与交流侧形成故障回路，影响交流侧的响应特性[10]。同时考虑到中低压配电网中性点接地的运行方式，若直流侧电容中性点直接或间接接地，任一换流器交流出口处发生单相接地故障时，会在交直流两侧构成零序回路，引起直流正负极电压工频共模振动，交流侧故障也会引起直流侧电气量的变化[11]。因此，交直流之间的故障交互影响加大了故障分析的难度，故障分量难以量化表达。

3）传统故障计算方法难以适用。传统故障计算方法一般基于线性网络原理提出，而大量逆变型分布式电源与电力电子设备高密度接入的特性，使得配电网成为一个高维非线性有源网络，对算法的时间复杂度、空间复杂度以及收敛性都带来了新的挑战[12]，传统的故障计算方法难以直接应用于配电网。

因此，面向高密度分布式电源接入后交直流配电系统呈现出的故障特征，传统故障分析方法显然已经无法适用。

2　故障分析研究现状

随着智能配电网与分布式发电技术的日益发展，含分布式电源的交直流配电系统故障分析逐渐引起了各个科研机构及众多学者的重视。

2.1　分布式电源故障电流特征与建模

分布式电源的接入导致配电网的故障电流大小以及分布规律发生变化，其影响与分布式电源的类型有关，目前研究通常考虑同步发电机、异步发电机、双馈异步风力发电机与逆变器并网型 4 种，采用同步发电机以及异步发电机并网的分布式电源研究

相对成熟。双馈发电机的故障电流特性与 Crowbar 电路（转子侧保护电路）工作方式有关，如果 Crowbar 电路在转子绕组出现过流后将其长期短路直至系统恢复正常运行，双馈发电机的故障电流输出特性与异步发电机类似，若采用主动式 Crowbar 电路实现低电压穿越，则需要在转子过流时启动 Crowbar 电路对转子侧变频器进行短路，而当转子电流下降到一定程度时断开 Crowbar，转子侧变频器恢复工作，此时双馈发电机可以向电网注入电流，提供有功和无功支持。在主动 Crowbar 模式下双馈发电机短路电流的初始值仍然比较大，大约 2～3 个周期后短路电流降至 1～1.5 倍的额定电流值，因此双馈发电机与常规异步电机的区别在于转子侧经变频器并网的故障响应部分。经逆变器并网的分布式电源故障特性较为复杂，但由于逆变器具有限流功能，输出的短路电流有限，根据荷兰 KEMA 公司发布的研究报告[13]，表 1 总结了不同类型分布式电源在不同并网方式以及不同时间阶段（次暂态、暂态与稳态）的短路电流变化特点[14]，表中的数值是短路电流值与额定电流之比（标幺值），据此可以估算分布式电源所提供的短路电流。

表 1　分布式电源短路电流变化特点
Table 1　Short-circuit current variations of distributed generations

发电机类型	次暂态短路电流		暂态短路电流		稳态短路电流	
	直接并网	经变压器并网	直接并网	经变压器并网	直接并网	经变压器并网
同步发电机	5～8	3～7	3～5	2～4	1～2	0.6～1.5
异步发电机	5～8	3～7	2～4	1－2	0	0
双馈发电机（普通 Crowbar）	5～8	3～7	2～4	1～2	0	0
双馈发电机（主动 Crowbar）	5～8	3～7	1～1.5	1～1.5	1～1.5	1～1.5
逆变器并网型	1～1.5	1～1.5	1～1.5	1～1.5	1～1.5	1～1.5

虽然通过表中数据可以得到分布式电源故障电流的初步规律，但是在进行继电保护以及配电自动化的相关研究时，需要获取更为准确的故障电流特征，如暂态分量的变化特征以及衰减规律等，以便寻求保护动作判据以及故障定位方法等，尤其采用逆变器并网的分布式电源其故障暂态过程较为复杂，与故障前分布式电源的输出功率、端电压、控制策略以及负荷等诸多因素相关，目前研究大多基于数字仿真技术开展，如文献[15]基于 RTDS 仿真平台揭示了分布式电源在故障发生、切除全过程中的暂态特性，并讨论了故障位置、电源输入功率及接入台数、无功功率注入量以及所接电网短路容量等因素对逆变电源故障暂态特性的影响规律；文献[16]基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台研究了分布式电源的对称故障和不对称故障响应特性；文献[17]基于 Simulink 仿真平台详细分析了控制器控制参数对逆变电源暂态响应的影响，并分析了不对称故障下不同控制策略对故障电流特性的影响。然而，受制于模型准确度的限制，仿真结果并不能全面反映故障电流的特征。理论解析方法可以深入地分析故障电流的分量特征、变化规律以及参数灵敏度等，相比于仿真分析具有明显的优势，但目前故障电流的理论解析研究较少，文献[18-19]针对风力发电系统故障电流特性进行了推导，为理论解析逆变型分布式电源的故障特性提供了思路。因此，通过对逆变器控制机理以及输出特性的分析，研究逆变器不同控制策略及系统参数下故障特征的时域解析是获取故障电流特征的关键所在。

在故障电流的量化计算方面，同步发电机以及异步发电机的计算模型较为完善，目前研究主要针对经逆变器并网的分布式电源展开，如文献[20]提出了时变电压源与恒定阻抗的等值模型，将控制系统的微分方程引入到模型中，通过将微分方程差分化对不同时刻的暂态分量进行了求解，但其计算过程非常复杂，工程实用计算中不必进行如此复杂的分析，一般基于电力电子设备的快速响应特性取故障后的稳态模型，早期开展的相关研究由于没有低电压穿越要求，一般将逆变型分布式电源等效为 *PQ* 静态节点[21-22]，文献[23]将逆变型分布式电源进行了简化处理，等效为过流系数控制的正序受控电流源。随着各个国家针对分布式电源入网的低电压穿越运行技术规范出台，低电压穿越控制下故障电流特性又呈现出了新的特点，根据电压跌落程度分为 3 个阶段：Ⅰ阶段，电压在 0.9（标幺值）以上时，分布式电源维持恒功率输出；Ⅱ阶段，电压在（0.2，0.9）区间时，保持不脱网运行并向系统提供无功支持；Ⅲ阶段，电压跌落至 0.2 以下脱网运行，其中Ⅱ阶段故障穿越时会对最大输出电流进行限制（1.2～1.5 倍的额定电流）。现有Ⅰ阶段恒功率模型的研究已经较为明确，基于正序分量控制策略建立正序受控电流源模型；Ⅱ阶段在穿越不对称故障时，负序分量的存在对故障穿越的控制策略又提出了新的要求[24-25]，文献[26]以及文献[27]针对负序电流注入的控制策略，将逆变型分布式电源等效为正负与负序同时受控的电流源。实际上，穿越不对称故障时针对分布式电源输出功率的不同需求存在不同的控制策略，文献[27]针对故障穿越时的不同控制策略建立了统一的电流受控表达形式，但需考虑脱网时

序不断更新不脱网机组集合。上述研究一般针对一个或者几个分布式电源展开研究，尚未从故障电流分布的时空关联特性深入探索，等值模型难以适用于高密度接入的场景。

2.2　交直流配电系统故障特征分析与建模

基于全控型电力电子晶体管（IGBT）的柔性直流系统具有潮流控制灵活、无换相失败等优点，成为目前研究的主要趋势。其中基于两电平电压源型换流器（VSC）在实际工程中应用较为广泛，文献[28]分析了直流电缆故障暂态特征，据此提出了接地故障的定位方法；文献[29]分析了直流配电网两极短路故障的暂态过程，提出用电阻型超导限流器来限制故障电流的上升，从而保障现有保护技术的可靠性；文献[30]建立了直流配电网单极接地故障的模型，分析了故障电流的特征，并提出了单极接地的故障定位方法。由于两电平 VSC 存在输出电能质量差、开断频率高、开关损耗大等缺点，因此模块化多电平换流器（MMC）通过采用阶梯波调制的方式改善了上述缺点，相关学者开展了基于 MMC 的研究，如文献[31]分析了 MMC 型直流系统的故障特征，并指出了直流系统继电保护面临的难题；文献[32]结合深圳多端柔性直流配电示范工程，通过分析 MMC 换流器及直流配电网的故障特性，提出了相应的保护配置方案。上述研究对直流侧极间故障的分析做了较为深入的探讨，将故障暂态过程分为储能元件放电以及交流电流注入 2 个阶段，各阶段通过微分方程描述直流电压以及电流的响应特性，其故障特性理论上分析相对较为清晰。

在交直流配电系统中还需要分析交流故障对直流侧的影响，以便能全面分析故障特征。高压输电系统中普遍遵循 IEC 60909 和 ANSI 短路计算标准，交流侧系统发生故障时忽略直流系统的短路电流影响，一是考虑直流输送容量相对交流较小，忽略其短路电流不会引起太大误差，二是故障后逆变器发生换相失败形成短路通路，从而隔离交直流系统[33]。但在直流配电系统中采用 IGBT 不存在换相失败的问题，而且直流配电系统中会接入大量的分布式电源，并非单一的受端系统，因此交流侧配电系统故障时，交直流两侧的交互影响仍需进一步探索。文献[34]针对交流侧故障、中压直流侧故障、低压直流侧故障以及功率开关元件故障等进行了仿真分析；文献[35]对交流及直流故障分别进行了仿真分析，并提出了相应的保护措施；文献[36]基于 PSCAD/EMTDC 平台，研究了不同故障隔离及恢复策略下交直流系统的故障响应特性。但目前在故障理论推导和机理分析方面研究较少，尤其在交流侧发生三相短路以及单相短路等不同故障类型，以及换流器采用不同控制策略时，交直流系统之间呈现不同的故障响应特性，尚需从理论上进一步进行分析与探索。

在故障计算建模方面，交流配电网络的故障模型相对完善，直流配电系统研究相对较少，文献[37-38]指出在交流电流注入阶段的交直流侧短路电流水平，对电网规划、交直流系统保护配置、设备选型等更具有工程意义，并基于 MMC 推导了极间故障时交流侧和直流侧稳态短路电流的实用工程计算方法。上述研究更适用于背靠背的网络拓扑结构，而在中低压直流网络中存在直流馈线、分布式电源、直流负荷以及 DC/AC 和 DC/DC 等电力电子装置[39-40]，需要进行系统级建模，文献[41]建立了基于 DC/DC 变换器的多端口直流配电系统故障电流稳态数学模型，但其网络结构更类似直流变电站。面向直流配电网络的规划设计等多方面需求，亟须建立包含多元化设备的源-网-荷系统级故障计算模型。

此外，交直流系统之间的等值建模目前研究较少，文献[34,42]分析了交流侧三相短路以及单相短路时直流侧馈入短路电流的机理，并根据不同的暂态过程给出了短路电流的计算公式；文献[43]考虑交流系统不对称条件下换流阀非等间隔导通和三相换相角不相等对开关函数的影响，提出了改进的换流器动态相量模型；文献[44]基于交流系统不对称故障下换流器的特性，提出了直流系统的等值模型，但上述研究主要针对高压直流输电系统展开，对于采用 IGBT 的直流配电系统，其故障机理已经完全不同，交直流系统之间的等值建模也需重新探讨。

2.3　故障计算方法研究现状

现有交流配电系统故障计算方法基本沿用了传统输电网的方法，通常分为序分量法和相分量法两类。序分量法实现了三相对称元件的三序解耦，计算效率较高，在输电系统中得到了较为广泛的应用，部分学者将其应用到了配电系统中。文献[45-46]基于 Fortescue 理论将对称分量法扩展应用到单相、两相及三相元件并存的多态相量配电网，通过降低矩阵维数提高了潮流及故障计算的效率，但未考虑分布式电源的非线性特征。将序分量法应用到配电系统中仍然存在较多的问题，当同时计及配电线路以及负荷的不对称特性，序分量法无法实现各序网络的解耦，且故障的模拟需在复合序网下建立故障边界条件，故障模拟较为复杂。

相分量法对三相元件直接建模，由 Laughton 于 1968 年首次提出，其物理概念清晰，易处理不对称元件，对于故障的模拟较为简单[47]。基于相分量的端口补偿法利用了配电网纯辐射状或者含有少量

闭环回路的特点，计算效率较高，因而被应用于配电网故障计算中[48-49]。上述研究虽然取得了部分成果，但针对逆变型分布式电源接入所形成的非线性网络求解方法，一般采用不动点迭代，该算法对初值选择要求较高，初值给定不合适将导致计算不收敛，而且在算法求解与数据存储效率等方面涉及较少，有学者提出了基于二阶变系数差分方程的快速计算方法[12]，但其分布式电源模型以电压源与阻抗串联的线性化模型描述，没有考虑低电压穿越控制下的时空关联影响，方法的适用性有限。

在交直流故障混合求解算法方面，针对直流输电系统已有相关研究，如文献[44]采用开关函数法和序分量法建立了换流器的等值模型，提出了交直流互联系统交替迭代的故障计算方法；文献[50]提出了基于弦截法的交直流统一迭代求解方法，但面向交直流配电系统尚缺乏相关研究，可以借鉴直流输电系统的思路进行探索。

因此面向未来配电网的发展规模与需求，尚需在故障计算方法方面展开深入研究，尤其在算法的收敛性、时间复杂度、空间复杂度以及交直流的混合求解方法方面亟待探索。

3　关键问题研究展望

上述研究虽然取得了一定程度的进展，但面向高密度分布式电源接入的交直流配电网故障分析，尚有诸多关键问题需要进一步研究，如图 2 所示。

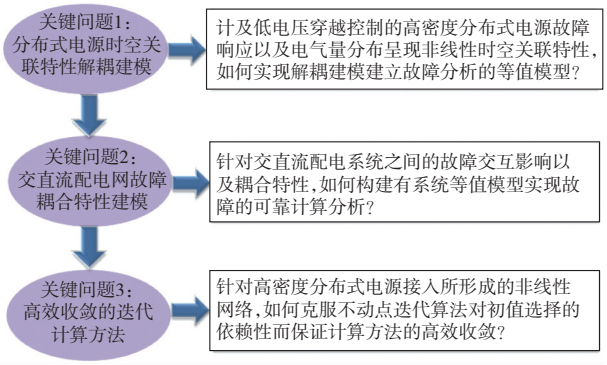

图 2　配电网故障分析的关键问题
Fig.2　Key issues of distribution system fault analysis

3.1　分布式电源故障特性理论解析与解耦建模

如前所述，在交流配电系统中计及低电压穿越控制时，依据并网点电压的跌落程度，分布式电源存在恒功率输出、故障穿越以及脱网运行 3 种不同的输出模式，尤其高密度接入时彼此之间相互影响，逆变型分布式电源在不同时间段的出力特性、不同故障点电压跌落程度以及低电压穿越控制下的不同输出模式，使得故障响应以及电气量的分布呈现非线性时空关联特性，因此在进行理论解析时可进行适当的降阶简化，建立计及控制参数与系统阻抗的故障电流与电压复频域函数[51]，通过拉普拉斯反变换获取时域解析表达，实现超调量、过渡时间等动态响应指标以及不同参数灵敏度的定性分析。

在分布式电源的故障计算建模方面，目前研究一般以一个或几个分布式电源为研究对象，且网络规模较小，通常采用穷举的方法先以恒功率模型代入计算，根据收敛后的电压值进行判断，若处于故障穿越阶段或者脱网运行，需重新选择模型计算[27]，面向高密度的分布式电源，该方法显然不可行，可以试想，系统中如果有 100 个分布式电源，每个分布式电源按照 3 个模型穷举，其排列组合的最大计算量为 3^{100}！。模型选择不正确甚至会导致计算结果不正确或者不收敛，因而在故障计算时如何避免穷举，实现与时空关联参数的解耦，进而建立准确的等值模型是亟待解决的关键问题。在理论解析的基础上，可通过研究不同网络参数、故障位置以及分布式电源出力等时空参数对故障电流与电压的灵敏度，从而提取系统短路容量、网络短路阻抗以及分布式电源出力等关键时空分布参数[52]，利用拟合方法将时空关联参数归一化[53]，建立电压估计函数，进而通过电压预估建立准确的故障计算模型，实现与时空关联参数的解耦建模。

3.2　交直流配电系统故障耦合特性建模

交直流配电系统主要通过换流器互联，因此，交流侧与直流侧故障时，其故障耦合回路通过换流器流通。当直流侧发生双极故障时，在交流电流注入阶段交直流之间会形成故障回路进而影响交流侧电流，故障回路如图 3 所示。

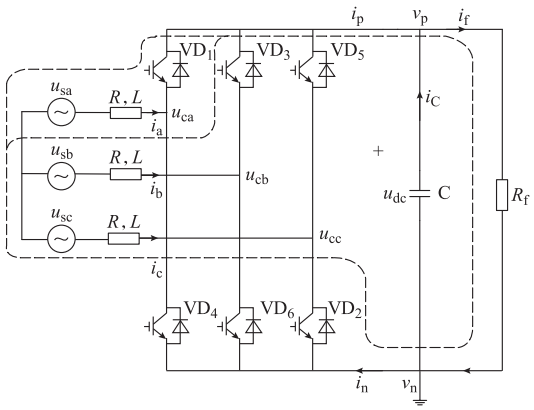

图 3　直流故障流通回路
Fig.3　Flow diagram of DC fault circuit

而换流器交流出口处发生单相接地故障时，尤其在中低压交流配电网络中性点接地时，由于零序分量的存在会引起直流正负极电压工频共模振

动[54]，其零序回路如图 4 所示。

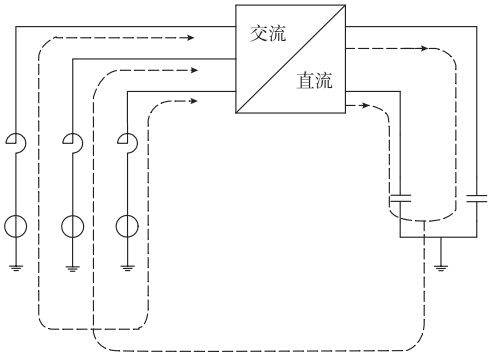

图 4　零序回路流通图

Fig.4　Flow diagram of zero sequence circuit

因此，如何计及交直流之间的故障耦合特性，建立准确的交直流配电系统故障分析模型，也是一个亟待解决的关键问题。针对上述问题可通过研究交直流故障耦合回路的电气量特征，利用换流器模型进行等值，在建立换流器交直流侧电气量微分方程的基础上，通过解析的方式得到其稳态解进而建立稳态模型[37]，分别将换流器的交流量及直流量等值到交流系统与直流系统进行故障计算，利用换流器的边界条件实现交直流配电系统的故障耦合特性分析与计算[44]。

此外，直流配电网络是一个包含多源多载的系统，其内部故障时的计算模型同交流系统类似，需建立完整的网络及元件模型，由于直流分布式电源没有低电压穿越的要求，因此建模相对容易，但 DC/DC 以及 DC/AC 等电力电子变换环节需考虑其不同的控制策略及输出特性，建立故障电流的稳态数学模型，以实现直流网络内部故障时的计算分析。

3.3　高效收敛的非线性迭代计算方法

配电网络采用三相建模时，矩阵维数为节点数的 3 倍，当网络规模较大时，如采用端口补偿法，故障端口等效电压的获取需要对高维的节点电压方程组进行求解，而端口等效阻抗计算涉及高维矩阵的求逆，对算法的时间复杂度以及空间复杂度提出了新的挑战，而配电网络辐射状的特点使得三相节点导纳矩阵具有结构上的对称性以及稀疏性，因此可利用这一特点，采用诸如改进 Cholesky 方法等实现因子分解[55]，基于稀疏向量法实现节点电压方程的高效求解[56]。

高密度逆变型分布式电源以及大量电力电子设备接入后，无论交流系统还是直流系统都存在较强的非线性问题，故障计算成为一个高维非线性方程组的求解问题，现有故障计算方法无论是采用节点阻抗矩阵还是导纳矩阵进行迭代，均属于不动点迭代方法，收敛域较小，对初值选择的依赖性较高，需要给定接近于真实解的初值才能保证收敛性，而故障时电压偏离初始运行点较多，真实解难以估计，初值给定不合适将导致计算不收敛。针对该问题可利用同伦迭代等全局收敛的计算方法[57]，通过构造不动点同伦函数，保证任意初值启动迭代均能计算收敛。

考虑交直流配电系统的故障耦合特性，可基于换流器的边界等效方程，利用交直流交替迭代或者统一迭代的方法实现故障电流求解，但需采取相应方法提高算法的收敛性能，如弦截法[50]，混合迭代法[58]，双向迭代法[59]等。

4　结论

配电网的迅速发展促进了各种新能源、储能装置、电力电子换流设备等大量分散接入，给传统的配电网故障分析理论带来了极大的挑战，因此探索新的故障分析方法具有重要的理论意义与工程价值，可以为配电网的继电保护整定、安全运行评估及规划设计等提供理论依据与技术支撑。面向配电网故障分析面临的挑战，本文梳理了未来需要关注的几个关键问题。

1）单一分布式电源的故障特性分析与建模研究较为成熟，但高密度接入时的时空关联特性及建模方法尚需进一步探索。

2）交直流混联是未来配电网的发展趋势，基于 VSC 以及 MMC 的直流侧极间故障研究较多，其故障特性相对清晰，但交直流系统之间的交互特性与等效建模，尤其含多源多载的直流网络分析以及建模尚不成熟。

3）故障计算方法目前多采用不动点迭代，需要综合考虑算法的时间复杂度、空间复杂度以及收敛性等多方面因素，研究更为可靠高效的方法。

参 考 文 献

[1] 江道灼，郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化，2012，36(8)：98-104.
JIANG Daozhuo，ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power System，2012，36(8)：98-104.

[2] 宋强，赵彪，刘文华.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报，2013，33(25)：9-19.
SONG Qiang，ZHAO Biao，LIU Wenhua. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(25)：9-19.

[3] 孙充勃.含多种直流环节的智能配电网快速仿真与模拟关键技术研究[D].天津：天津大学，2015.

[4] 李霞林，郭力，王成山，等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报，2016，36(1)：2-17.
LI Xialin，GUO Li，WANG Chengshan，et al. Key technologies of DC microgrids：an overview[J]. Proceedings of the CSEE，

2016，36(1)：2-17.
[5] 卫志农，余爽，孙国强，等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化，2013，37(13)：1-9.
WEI Zhinong，YU Shuang，SUN Guoqiang，et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37 (13)：1-9.
[6] 王成山，宋关羽，李鹏，等.基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J].电力系统自动化，2016，40(22)：168-175.DOI：10.7500/AEPS20160620009.
WANG Chengshan，SONG Guanyu，LI Peng，et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(22)：168-175. DOI：10.7500/AEPS20160620009.
[7] 吕金炳.智能配电条件下的DFACTS应用研究[D].天津：天津大学，2012.
[8] TROESTER E. New German grid codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid[R/OL].[2017-06-01]. http://www.concentrating-pv.org.
[9] 杨杉，同向前.含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J].电力系统自动化，2016，40(11)：93-99.DOI：10.7500/AEPS20150929002.
YANG Shan，TONG Xiangqian. Short-circuit current calculation of distribution network containing distributed generators with capability of low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(11)：93-99. DOI：10.7500/AEPS20150929002.
[10] RAFFERTY J，XU L，MORROW D J. DC fault analysis of VSC based multi-terminal HVDC systems[C]// 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)，December 4-5，2012，Birmingham，UK，2013：1-6.
[11] BYEON G，LEE H，YOON T，et al. A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system[C]// 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE)，May 30-June 3，2011，Jeju，South Korea，2011：543-550.
[12] 孙毅卫，王志文，汪雨辰，等.含高密度分布式电源的配电网短路电流快速计算方法[J].电力建设，2016，37(5)：118-124.
SUN Yiwei，WANG Zhiwen，WANG Yuchen，et al. A fast calculation method for short circuit current of distribution network with numerous distributed resources[J]. Electric Power Construction，2016，37(5)：118-124.
[13] MORTLEY C. The contribution to distribution network fault levels from the connection of distributed generation[R]. KEMA Ltd.，2005.
[14] 徐丙垠.配电网继电保护与自动化[M].北京：中国电力出版社，2017.
[15] 毕天姝，刘素梅，薛安成，等.逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J].中国电机工程学报，2013，33(13)：165-171.
BI Tianshu，LIU Sumei，XUE Ancheng，et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources [J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(13)：165-171.
[16] 孔祥平，张哲，尹项根，等.含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J].中国电机工程学报，2013，33(34)：65-74.
KONG Xiangping，ZHANG Zhe，YIN Xianggen，et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(34)：65-74.
[17] 李斌，张慧颖，段志田，等.逆变型电源控制策略对其故障暂态的影响分析[J].电力系统及其自动化学报，2014，26(12)：1-7.
LI Bin，ZHANG Huiying，DUAN Zhitian，et al. Analysis of the effect of control strategy on the fault transient characteristics of inverter-based distributed generators [J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2014，26(12)：1-7.
[18] 王强钢，周念成，李喜兰，等.计及低电压穿越的双馈感应发电机三相短路运算曲面法[J].电力系统自动化，2015，39(18)：49-54.DOI：10.7500/AEPS20141124006.
WANG Qianggang，ZHOU Niancheng，LI Xilan，et al. Three phase short circuit calculating method based on pre-computed surface for doubly fed induction generators considering low voltage ride through [J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(18)：49-54. DOI：10.7500/AEPS20141124006.
[19] 宋国兵，常仲学，王晨清，等.直驱风机三相短路电流特性分析[J].西安交通大学学报，2015，49(10)：1-7.
SONG Guobing，CHANG Zhongxue，WANG Chenqing，et al. Three phase fault current characteristics of permanent magnet synchronous generator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2015，49(10)：1-7.
[20] BARAN M E，EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Trans on power systems，2005，20(4)：1757-1764.
[21] 王成山，孙晓倩.含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J].电力系统自动化，2012，36(23)：54-58.
WANG Chengshan，SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(23)：54-58.
[22] 王守相，江兴月，王成山.含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J].电力系统自动化，2008，32(5)：38-42.
WANG Shouxiang，JIANG Xingyue，WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems，2008，32(5)：38-42.
[23] 杨杉，同向前，刘健.含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J].电网技术，2015，39(7)：1977-1982.
YANG Shan，TONG Xiangqian，LIU Jian. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology，2015，39(7)：1977-1982.
[24] RODRIGUEZ P，TIMBUS A，TEODORESCU R，et al. Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults [J]. IEEE Trans on Power Electronics，2009，24(7)：1798-1801.
[25] MIRET J，CASTILLA M，CAMACHO A，et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Electronics，2012，27(10)：4262-4270.
[26] 刘素梅，毕天姝，王晓阳，等.具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J].电力系统自动化，2016，40(1)：1-7.DOI：10.7500/AEPS20150327003.

LIU Sumei, BI Tianshu, WANG Xiaoyang, et al. Fault current characteristics of inverter interfaced renewable energy generators with asymmetrical fault ride-through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150327003.

[27] 周念成，叶玲，王强钢，等.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(16)：41-49.
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 41-49.

[28] YANG J, FLETCHER JE, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cable [J]. IEEE Trans on Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.

[29] 李斌，何佳伟.柔性直流配电网系统故障分析及限流方法[J].中国电机工程学报，2015，35(12)：3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.

[30] 徐铭铭，肖立业，林良真.直流配电网单极接地故障定位方法[J].电工电能新技术，2015，34(11)：55-62.
XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. Method of locating single-pole-to-ground fault in DC distribution system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(11): 55-62.

[31] LI Bin, HE Jiawei, TIAN J, et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 275-282.

[32] 孙刚，时伯年，赵宇明，等.基于MMC的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J].电力系统保护与控制，2015，43(22)：127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.

[33] 王铁柱，万磊，卜广全，等.逆变侧交流系统三相短路时直流系统贡献短路电流的机理和计算方法研究[J].电网技术，2016，40(5)：1313-1319.
WANG Tiezhu, WAN Lei, BU Guangquan, et al. Mechanism and calculation method study of DC system contributed short-circuit current with three-phase short-circuit fault on inverter side[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1313-1319.

[34] 周廷冬，徐永海.基于MMC的配电网电力电子变压器故障特性分析[J].电工电能新技术，2017，36(5)：34-41.
ZHOU Tingdong, XU Yongmei. Fault characteristic analysis of power electronic transformer based on MMC in distribution network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 34-41.

[35] 胡竞竞.直流配电系统故障分析与保护技术研究[D].杭州：浙江大学，2013.

[36] LI Gen, LIANG Jun, UGALDE-LOO C E, et al. Dynamic interactions of DC and AC grids subject to DC faults[C]// 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 2627-2633.

[37] 李斌，李晔，何佳伟，等.基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J].电力系统保护与控制，2016，44(21)：1-8.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.

[38] 张国驹，祁新春，陈瑶，等.模块化多电平换流器直流双极短路特性分析[J].电力系统自动化，2016，40(12)：151-157. DOI: 10.7500/AEPS20150819005.
ZHANG Guoju, QI Xinchun, CHEN Yao, et al. Characteristic analysis of modular multilevel converter under DC pole to pole short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 151-157. DOI: 10.7500/AEPS20150819005.

[39] 吴鸣，刘海涛，陈文波，等.中低压直流配电系统的主动保护研究[J].中国电机工程学报，2016，36(4)：891-899.
WU Ming, LIU Haitao, CHEN Wenbo, et al. Research on active protection for MV/LV DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 891-899.

[40] CORTI M, TIRONI E, UBEZIO G. DC networks including multi-port DC/DC converters: fault analysis[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2016, 52(5): 3655-3662.

[41] ZHANG J, JOVCIC D, LIN W. Steady-state DC fault analysis of multiport DC hub[C]// European Conference on Power Electronics and Applications, August 26-28, 2014, Lappeenranta, Finland, 2014: 1-10.

[42] 王铁柱，万磊，张彦涛，等.交流侧单相短路时直流系统提供短路电流的特性分析[J].电网技术，2016，40(7)：1970-1977.
WANG Tiezhu, WAN Lei, ZHANG Yantao, et al. A study of characteristic of short-circuit current contributed by DC systems with single-phase short-circuit fault on AC side[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1970-1977.

[43] 王钢，李志铿，李海峰，等.交直流系统的换流器动态相量模型[J].中国电机工程学报，2010，30(1)：59-64.
WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng, et al. Dynamic phasor model of the AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 59-64.

[44] 于春光，陈青，高湛军.计及直流接入的交流系统故障计算模型研究[J].电力系统保护与控制，2013，41(3)：1-7.
YU Chunguang, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A fault analysis model for AC system interconnected by HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 1-7.

[45] DŽAFIĆ I, NEISIUS H T, GILLES M, et al. Three-phase power flow in distribution networks using Fortescue transformation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1027-1034.

[46] RABIH A J, DŽAFIĆ I. A Fortescue approach for real-time short circuit computation in multiphase distribution networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(6): 3276-3285.

[47] KOCAR I, LACROIX J S, THERRIEN F. General and simplified computation of fault flow and contribution of distributed sources in unbalanced distribution networks[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-8.

[48] OU T C. A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid

distribution systems[J]. Electrical Power and Energy Systems，2012，43(1)：1017-1024.

[49] LIN W M，OU T C. Unbalanced distribution network fault analysis with hybrid compensation [J]. IET Generation，Transmission & Distribution，2011，5(1)：92-100.

[50] 贠飞龙，刘崇茹，李越，等.含直流馈入的交流系统故障分析模型[J].电力系统自动化，2015，39(22)：124-130.DOI：10.7500/AEPS20150109006.
YUN Feilong，LIU Chongru，LI Yue，et al. Model of AC system fault analysis with DC infeed [J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(22)：124-130. DOI：10.7500/AEPS20150109006.

[51] 徐敏，蔡泽祥，李晓华，等.考虑频变参数和直流控制的直流输电系统线路故障解析[J].电力系统自动化，2015，39(11)：37-44.
XU Min，CAI Zexiang，LI Xiaohua，et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency dependent parameters and HVDC control[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(11)：37-44.

[52] SANTOS-MARTIN D，LEMON S. Simplified modeling of low voltage distribution networks for PV voltage impact studies[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2016，7(4)：1924-1931.

[53] 夏泠风，黎嘉明，赵亮，等.考虑光伏电站时空相关性的光伏出力序列生成方法[J].中国电机工程学报，2017，37(7)：1982-1992.
XIA Lingfeng，LI Jiaming，ZHAO Liang，et al. A PV power time series generating method considering temporal and spatial correlation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(7)：1982-1992.

[54] 高一波，徐习东，金阳忻，等.交流侧接地故障对直流配电网电压平衡影响[J].电网技术，2014，38(10)：2665-2670.
GAO Yibo，XU Xidong，JIN Yangxin，et al. Impact on the voltage balancing of DC distribution network under AC side grounding fault[J]. Power System Technology，2014，38(10)：2665-2670.

[55] LACROIX J S，KOCAR I，BELLETÊTE M. Accelerated computation of multiphase short circuit summary for unbalanced distribution systems using the concept of selected inversion[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(2)：1515-1522.

[56] 高毅，王成山，李继平.改进十字链表的稀疏矩阵技术及其在电力系统仿真中的应用[J].电网技术，2011，35(5)：33-39.
GAO Yi，WANG Chengshan，LI Jiping. An improved cross chain table based sparse matrix technology and its application in power system simulation[J]. Power System Technology，2011，35(5)：33-39.

[57] LIU P，CHIANG H. Homotopy-enhanced short-circuit calculation for general distribution networks with non-linear loads[J]. IET Generation Transmission & Distribution，2016，10(1)：154-163.

[58] 彭克，咸日常，张新慧，等.多端互联交直流配电网的潮流分层控制策略及算法[J].电力系统自动化，2016，40(14)：72-77.DOI：10.7500/AEPS20151119004.
PENG Ke，XIAN Richang，ZHANG Xinhui，et al. Hierarchical power flow control strategy and algorithm for multi-terminal interconnected AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(14)：72-77. DOI：10.7500/AEPS20151119004.

[59] 薛振宇，房大中.基于双向迭代的交直流互联电力系统潮流计算[J].电力系统自动化，2013，37(5)：61-67.
XUE Zhenyu，FANG Dazhong. A power flow calculation algorithm for AC/DC interconnected power systems based on bi-directional iteration [J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(5)：61-67.

彭　克(1983—)，男，通信作者，博士，讲师，主要研究方向：分布式发电系统，交直流配电网。E-mail：pkbest@tju.edu.cn

张　聪(1992—)，男，硕士研究生，主要研究方向：智能配电网与综合能源系统。E-mail：choolla@live.com

徐丙垠(1961—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：智能配电网与配电自动化。E-mail：xuby@vip.163.com

（编辑　代长振）

Key Issues of Fault Analysis on Distribution System with High-density Distributed Generations

PENG Ke，ZHANG Cong，XU Bingyin，CHEN Yu，CHEN Jiajia，ZHAO Xueshen

(College of Electrical and Electronic Engineering，Shandong University of Technology，Zibo 255000，China)

Abstract: The future distribution system will have the significant characteristics such as high density integration of distributed generations，interconnection of AC/DC hybrid system. Therefore，the fault analysis for distribution system will face new challenges. As the integration of high density distributed generation and power electronic equipments，the fault response presents the property of nonlinear temporal-spatial correlation，and the fault response interaction influences between AC/DC system further increase the difficulty of fault analysis. In this paper，the current research status of the distribution system fault analysis is summarized，and the key issues to be studied in the future are proposed including the analysis and decoupling modeling of distributed generations for the temporal-spatial correlation characteristics，the equivalent modeling of AC/DC hybrid distribution system，and the effective convergence algorithm.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900605) and Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2017LEE022).

Key words: distributed generation; power electronics; AC/DC distribution system; fault analysis