

主动配电网中微网并网系统故障穿越研究

侯旭¹,曲雪莹²,王鹤³

(1. 国网长春供电公司 变电运维室,吉林 长春 130000;2. 杭州国电机械设计研究院有限公司,浙江 杭州 31000;
3. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘 要: 主动配电网是智能电网中配电网发展的高级技术阶段,是具备组合控制各种分布式能源(分布式电源、储能、可控负荷、需求侧响应)能力的配电网,是一种可以兼容微电网及其他新能源集成技术的开放体系结构核心。本文正是在这一结构核心的基础上,通过对光伏及风电并网系统的故障穿越方式进行研究,确定主动配电网瞬时故障期间微网的动作情况及其影响,并以此为依据尝试确定微网的故障穿越模式。同时对含微网的主动配电网进行了建模分析。

关键词: 主动配电网;微网;分布式能源;故障穿越

中图分类号: TM732

文献标识码: A

随着新型可再生能源技术的不断提高,分布式可再生能源在电力网络中的渗透率必将越来越高。这一现状会使得电力系统的规划和运行方式变得越来越复杂多变,最终将会导致传统电网结构模式无法适应现今高渗透率分布式能源的接入。为应对高渗透率分布式能源的接入这一必然发展趋势,专家们提出了微网的概念,同时在微网的基础之上开始进一步探索智能电网框架下的主动配电网技术模式,旨在解决大规模间歇式可再生能源接入配电侧,提升绿色能源利用率。这一配电网模式已经成为现今配电系统领域的热点研究问题,并且被认为是未来配电网的必然发展方向^[1-2]。

1 主动配电网

主动配电网是智能电网中配电网发展的高级技术阶段,其具备组合控制各种分布式能源的能力。主动配电网可以通过对并网协议及管理措施的调整,使得分布式能源可以承担一定对系统起到一定程度上的支撑作用。在这一基础上,调度人员可以通过对网络拓扑结构的高边来操控系统的运行状态,以实现电能分配与控制的主动性。这一配电网模式可以极大的增加配电网对间歇式可再生能源的接纳能力,可以有效提电网中能源利用^[3-5]。

主动配电网中的微网与常规状态运行下的微网的概念与运行方式也是有区别的。常规运行的微网并网运行时,一般仅可以实现局部的区域自治,对于内部分布式电源所发出的功率仅能在网内进行消纳,若所发电力过剩,只能降低电源出力,而无法将多余电能上传至所连接的电力系统中。而由于主动配电网对于间歇式能源可以有效的吸纳,所以当微网内部所发电力过剩时,可以将多余的电能上传至所连接的主动配电网。常规运行状态下的微网当遇到所接入的电力系统出现故障时,微网的控制策略一般是快速而无选择性地断开与电力系统的连接以保障自身的安全运行。而主动配电网则要求所连接的

微网根据故障的实际情况实时的做出判断以决定所要执行的动作。而这一情况,正是主动配电网与微网的矛盾所在^[6-7]。

但是,由于主动配电网可以根据不同故障及电网内部的不同特点,通过合理配置解列点,可以使得在局部范围内的分布式电源与相邻负荷以非常态方式孤岛运行,是一种可以兼容新能源集成技术的开放体系结构核心。这使得这一矛盾的解决有了一定的突破口。

本文正是在这一突破口的基础上,将光伏电站及风电场的故障穿越方式扩展到分布电源当中,并以此为基础推导主动配电网瞬时故障期间,主动配电网中高渗透率微网的动作情况及其影响,并以此来确定微网的故障穿越模式。

2 光伏及风电的故障穿越

2.1 光伏系统的故障穿越

在电力系统发生故障而导致电网电压跌落时,光伏并网发电系统不立即离网,而是继续保持与电网的连接并提供支撑,有利于电力系统故障的恢复。而一般情况下,在电网发生故障时,光伏并网系统为保障自身安全而立即解列,这种情况在光伏发电的穿透率较低时是可以接受的,此时光伏并网系统对电力系统影响很小;当光伏发电穿透率较高时,光伏并网系统在电力系统故障期间仍然采取被动式自我保护而解列,则会极大的增加电力系统中故障恢复的困难程度,甚至会使电力系统中的故障变得更为严重。因此光伏并网系统接入规则要求光伏电站应具备故障穿越能力,即在电网故障期间保持光伏电站不间断并网运行。故障穿越要求如图1所示,曲线1为低电压穿越曲线,曲线2为零电压穿越曲线。目前,采用的控制策略有基于控制算法和给予增加硬件这两种方法^[8-9]。

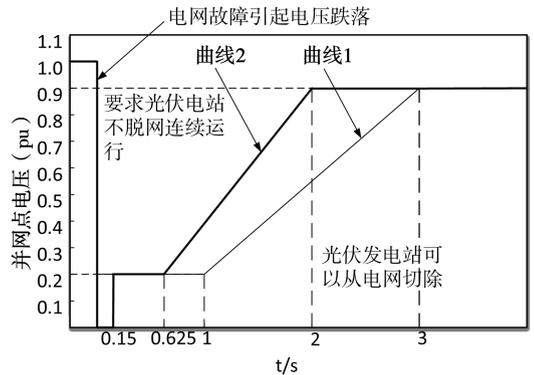


图1 光伏系统故障穿越曲线

2.2 风电机组的故障穿越

风电机组的故障穿越,指在风机并网点电压跌落的时候,风机能够保持持续并网,甚至向电网提供一定的无功功率,支持电网恢复,直到电网恢复正常,从而“穿越”这个低电压时间。

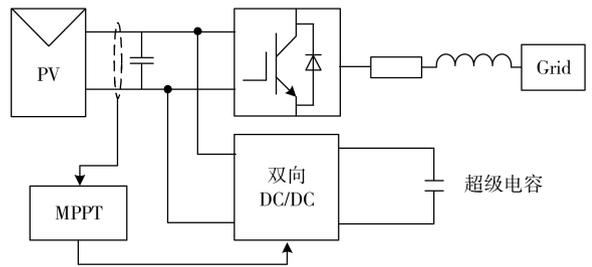


图2 光伏系统故障穿越系统结构图

一般来讲,仅当电网电压在时间或数值上处于图3所示曲线下方时,风机才允许解列;而在曲线以上区域,风机应保持并网,等待电网恢复。且当电压位于图中阴影区域时,还要求风机向电网提供无功功率支撑,帮助电网恢复。目前常用的风电机组故障穿越方式有:添加静态同步补偿器或静态无功补偿器,以及采用额外电路单元储存或消耗多余能量等几种^[10-11]。

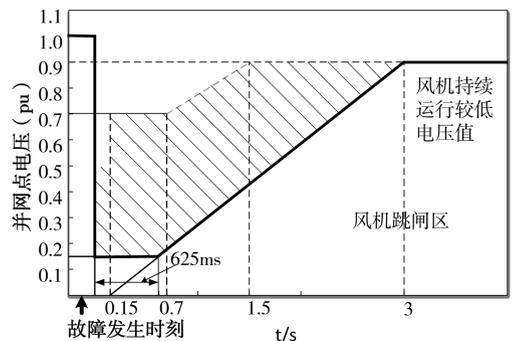


图3 风电系统故障穿越曲线

风电机组常采用双馈风机基于撬棒电阻的故障穿越控制策略。撬棒电阻并联连接在转子变流器和转子绕组之间,当检测到流过转子变流器的电流超过某一值后,撬棒电阻开关闭合,撬棒电阻接入系统,

经过一个固定的时间后或转子变流器的电流下降为某一值后,撬棒电阻开关打开,撬棒电阻切出系统。撬棒电阻保护转子变流器的机理是将转子绕组的电流引向自身,从而减少流向转子变流器的电流^[12-13]。同时,在变流器直流电容两端安装一个限制电阻,限制电阻的作用是限制电容的电压值。

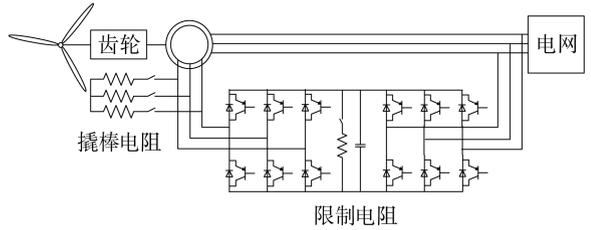


图 4 风电系统故障穿越系统结构图

3 微网的故障穿越

3.1 微网故障穿越简介

主动配电网中分布式电源的存在一方面在电网故障时,为用户提供了新的电源,是提高用户侧供电可靠性、提高配电网自愈能力的重要手段;另一方面,部分间歇式分布电源包括风能、太阳能、水能及由分布式电源及负荷形成的微网等,则需要有效的控制手段对其进行合理调控,否则将会对电网的电能质量带来负面影响。

电力网络中发生的故障会使分布式电源产生一系列异常的暂态过程,如电压、电流或电机转速的改变。这些非正常现象对分布式电源本身及其控制系统运行产生了异常恶劣的影响。因此为了给分布式发电设备提供最大限度的保护,绝大多数的分布式发电设备并网规程不要求分布式电源参与系统调节。当电力系统发生故障时分布式电源必须立即离网。这种处理方式在分布式电源渗透率较低时是可行的;然而当分布式电源的渗透率提高到一定成度后,若分布式电源还是采取在故障时离网的控制措施,会使整个电力系统故障恢复难度大幅度增加,甚至可能会使电力系统中故障变得更加严重,最终导致电网崩溃^[14]。

对于主动配电网中微网的故障穿越能力要从以下几个方面进行研究。①微网内部的微电源的故障穿越能力;②微网内部的敏感负荷的补偿能力。

也就是说微网的故障穿越研究需要分以下 2 个部分来进行:①将针对光伏电站及风电场的故障穿越原理应用到微网的分布式电源中;然后通过对微网内部分布式电源的故障穿越能力及微网内部的电压暂降补偿能力的研究推导微网对外的故障穿越能力;②根据微网的故障穿越情况确定微网内部敏感负荷的补偿方式及补偿容量。总的来说就是分为对外穿越和对内补偿这两部分进行研究^[15-16]。本文主要研究内容正是第一部分,即微网的对外穿越。

3.2 微网的对外穿越

风电厂及光伏电站的故障穿越标准,是风电及光伏的大型生产企业根据自身生产的设备参数及电网需求或国家根据本国的设备生产水平及电网标准制定的,既符合设备生产的经济性要求又符合电网安全运行的可靠性要求的一条相对最优曲线。随着科技的发展进步,其穿越成本必将越来越低,因此本文将风电厂及光伏电站的故障穿越技术应用。

同时由于微网的离网保护与主动配电网对于分布式电源的并网支撑要求产生了一定的矛盾。所以,在微网进行故障穿越前需对其内部进行分析。如若微网内部含有如医院等重要敏感负荷,则无条件离网转入孤岛运行。反之,如无重要敏感负荷,则还需通过对其内部进行系统稳定性分析,在系统失稳前要转入孤岛运行。

对于微网电压稳定性的判别,本文采用基于潮流解存在的电压稳定性判别方法,以输电线路的电压方程解存在与否作为衡量电压稳定性的指标。为了方便说明,本文将微网化简为等效两节点模型,如图 5。

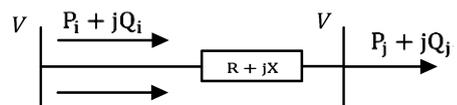


图 5 微网线路两节点模型

i 为潮流送端, j 为潮流受端。由此得线路方程如下:

$$V_i = V_j + I(R + jX), \quad (1)$$

$$V_i = V_j + \frac{S_j^*}{V_j^*} * (R + jX), \quad (2)$$

$$V_i = V_j + \frac{P_j - Q_j}{V_j^*} * (R + jX), \quad (3)$$

经过最终变形得到:

$$V_i = \frac{|V_j|^2 + P_j R + Q_j X + j(P_j X - Q_j R)}{V_j^*}, \quad (4)$$

将公式(4)改写成模值形式,得到:

$$|V_i| = \frac{\sqrt{(|V_j|^2 + P_j R + Q_j X)^2 + (P_j X - Q_j R)^2}}{|V_j|}, \quad (5)$$

进一步改写,得到:

$$|V_j|^4 + [2(P_j R + Q_j X) - |V_i|^2] |V_j|^2 + (P_j R + Q_j X)^2 + (P_j X - Q_j R) = 0. \quad (6)$$

根据方程解存在得到判据:

$$|V_i|^4 - 4|V_i|^2(P_j R + Q_j X) - 4(P_j X - Q_j R)^2 \geq 0. \quad (7)$$

随着线路潮流的增大,公式(7)趋于零,系统达到传输功率极限,超过这一极限时系统失稳。因此可以通过公式(7)的临界情况推导系统的电压稳定性指标。

电压稳定的临界条件为

$$|V_i|^4 - 4|V_i|^2(P_j R + Q_j X) - 4(P_j X - Q_j R)^2 = 0. \quad (8)$$

引入指数 VSI (Voltage Stability Index),即在公式(8)中分别以 $VSI \cdot P_j$ 、 $VSI \cdot Q_j$ 代替 P_j 和 Q_j 得到:

$$|V_i|^4 - 4|V_i|^2(P_j R + Q_j X) \times VSI - 4[(P_j X - Q_j R) \times VSI]^2 = 0. \quad (9)$$

通过公式(9)就可以定义电压稳定性指标 VSI。对于微网为方便计算,可以用送端量代替受端量,即以 $P_j + jQ_j = P_i + jQ_i - (R + jX) |I|^2$ 带入公式(9),解出 VSI 得到稳定性指标:

$$VSI = \frac{|V_i|^2 \sqrt{[(P_i - |I|^2 R)^2 + (Q_i - |I|^2 X)^2] (R^2 + X^2)}}{2(P_i X - Q_i R)^2} - \frac{|V_i|^2 [(P_i - |I|^2 R) R + (Q_i - |I|^2 X) X]}{2(P_i X - Q_i R)^2}. \quad (10)$$

通过推导可得以下结论:当 VSI 大于 1 时,系统稳定;当 VSI 等于 1 时系统达到临界状态;当 VSI 小于 1 时,系统失稳。根据这一判定条件就可确定微网是否稳定^[17]。

关于对外穿越,在微网稳定性允许的情况下,根据风电的低电压穿越标准、光伏的零电压穿越标准、微网内部的电压暂降补偿方法及微网的稳定性分析,本文尝试性的对主动配电网中微网系统的故障穿越能力提出了基本要求并对其进行了仿真实验。

如图 6 所示,当主动配电网发生故障时,针对电压跌落幅度提出以下要求:当电压跌落幅度不超过 75%,则微网继续保持并网运行;当电压跌落幅度在 30%~75% 这一区间,则微网不仅保持并网运行同时还要对主动配电网提供一定的功率支持;当电压跌落幅度超过 75% 时,则微网转入孤岛运行状态。针对所穿越的故障的时间提出以下要求:如果主动配电网故障超过 500 ms 还没开始恢复,则微网脱离主动配电网转入孤岛运行。如图 7 所示,根据这一穿

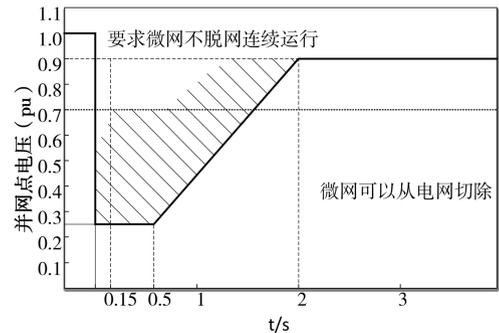


图 6 微网故障穿越曲线

越规则确定了微网的故障穿越流程。

4 算例仿真

4.1 仿真模型

如图 8 所示,在 PSCAD 中建立含分布式电源及高渗透率微网的主动配电网模型。其中主动配电网采用,改进的 IEEE 14 节点含风电的配电网模型^[18];微网采用风光储联合供电的简单微网模型,微网通过变压器及并网开关与主动配电网相连,微网的容量占配电网总容量的 40%。

在仿真时间处于第 4 秒时,整个系统处于一种稳定的运行状态。于此时在 14 节点产生不同的电压跌落故障,同时测量 5 节点的数据变化情况。为验证微网故障穿越与否对于主动配电网的影响,仿真实验将采用微网对于故障的不同处理方式对比仿真实验。

(1) 针对同一故障深度不同故障时间进行对比。

(2) 针对同一故障时间不同故障深度进行对比。

4.2 仿真结果

实验 1:在 14 节点产生跌落幅度为 68% 的电压跌落,故障时间分别为 0.15 s、0.3 s、0.6 s,同时测量 5 节点在不同控制模式下的电压跌落情况。其仿真结果如表 1 所示。

表 1 实验仿真运行结果

故障持续时间	故障处理方式	电压跌落深度
0.15 s	故障时微网与配电网脱离转入孤岛运行	83%
0.3 s	故障时微网保持并网运行	83%
0.6 s	故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定支撑	62%
0.15 s	故障时微网保持并网运行	68%
0.3 s	故障时微网保持并网运行	68%
0.6 s	故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定支撑	69%
0.15 s	故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定支撑	56%
0.3 s	故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定支撑	58%
0.6 s	故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定支撑	62%

可见微网的故障穿越有利于减小主动配电网故障时电压的跌落幅度。同时故障穿越期间微网对于主动配电网的支撑,可以有效的减小主动配电网的电压跌落幅度。如图 9 到图 11 所示,故障持续时间为 0.15 s,采用的控制方式为故障时微网保持并网运行同时对主动配电网提供一定功率支撑。

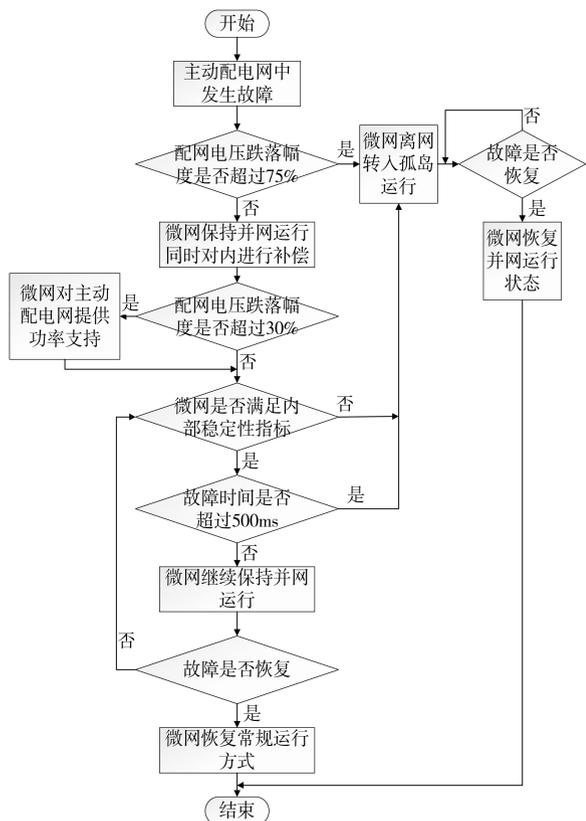


图 7 微网故障穿越基本流程图

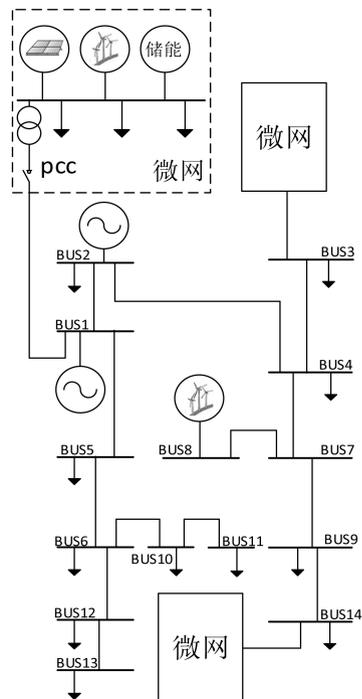


图 8 含微网的主动配电网结构图

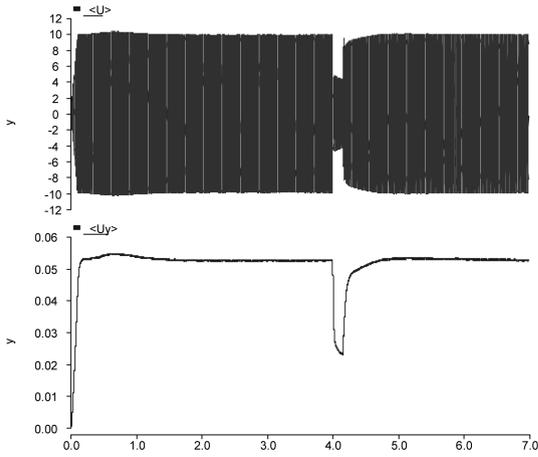


图9 故障时负荷电压

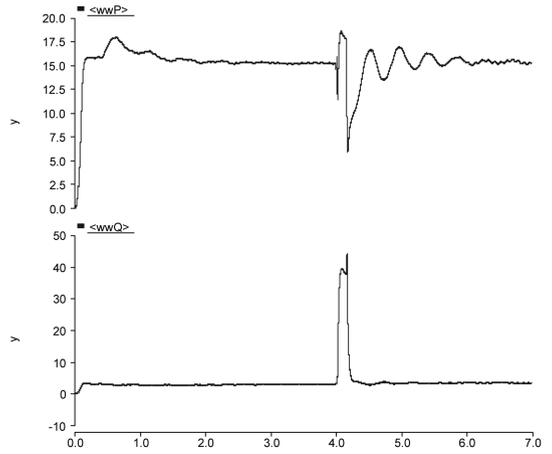


图10 故障时微网并网点(PCC)的功率

从实验1可以看出,随着故障时间的增加,微网对于主动配电网的支撑能力逐渐减弱,同时在故障结束时对主动配电网稳定性的干扰逐渐增强,在故障时间为0.6 s时,在故障后期微网支撑能力明显不足。所以将微网的故障穿越时间设定为如果主动配电网故障超过500 ms 还没开始恢复,则微网脱离主动配电网转入孤岛运行。

实验2:在14节点产生故障时间为0.15 s,跌落幅度分别为25%、35%、55%的电压跌落,同时测量5节点在不同控制模式下的电压跌落情况。仿真结果如表2所示。

表2 实验仿真运行结果

系统故障深度	故障处理方式	微网动作后电压的跌落深度
25%	电压跌落超过10% 微网离网	41%
	电压跌落超过20% 微网离网	26%
	电压跌落超过30% 微网离网	25%
35%	电压跌落超过10% 微网离网	62%
	电压跌落超过20% 微网离网	60%
	电压跌落超过30% 微网离网	38%
55%	电压跌落超过10% 微网离网	75%
	电压跌落超过30% 微网离网	75%
	并网时对电网提供支撑 电压跌落超过75% 微网离网	49%

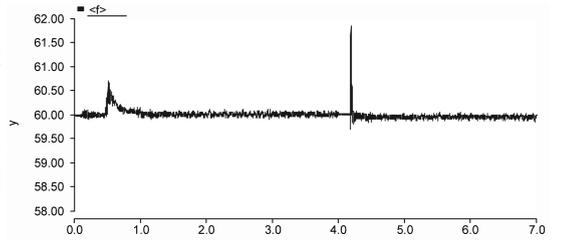


图11 系统频率变化曲线

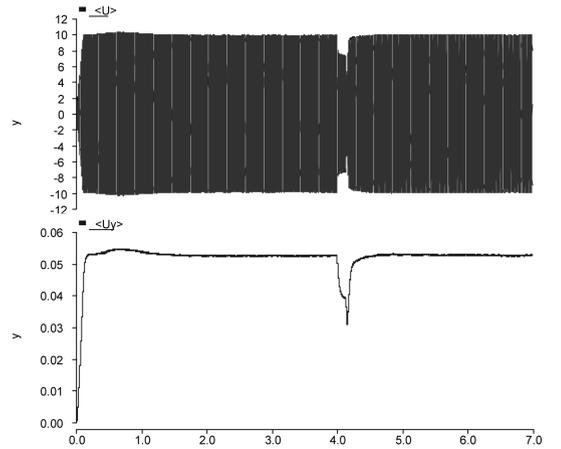


图12 故障时负荷电压

如图12所示,故障深跌落度为25%,在当电压跌落超过10%微网离网这一控制模式下,系统的电压跌落情况。同时,通过故障深度为25%的三组对比试验可以看出,微网足够的故障穿越深度可以有效防止电压的二次跌落,有益于配电网的故障清除。

从实验2可以看出,当主动配电网电压跌落时,微网所穿越的故障程度越深、离网时间越晚,则在同一故障下,主动配电网电压的跌落幅度越小。因此故障时微网的故障穿越可以有效防止故障的加深,有利于主动配电网的自愈。因此当遇到较为严重的故障时,微网需要较深的故障穿越能力才可以有效的降低主动配电网的电压跌落幅度。同时足够容量的微网对主动配电网的支撑可有效减小电压的跌幅。同时综合考虑微网内部分布式电源的故障穿越能力,将微网的故障穿越深度拟定为75%。

由上述所有实验可以得出,微网的故障穿越是有继续深入研究的价值的。但在其故障穿越的基础上,其对微网内部分布式电源的控制及对微网内部的敏感负荷的补偿还需进行更为深入详细的研究,以确保故障穿越期间微网内部的分布式电源和敏感负荷不受影响,因为这是推行微网故障穿越的重要前提。

5 总结与展望

综上所述,可见微网对于瞬时故障的穿越,有利于主动配电网瞬时故障的处理。微网的这一故障处理方式可以有效的减小故障时主动配电网的电压跌落幅度,同时可有效的防止因大规模分布式电源离网带来的配电网整体解列的问题。对于高渗透率可再生能源接入主动配电网有着积极意义。

随着国家对于可持续发展这一国策的重视度越来越高,可再生清洁能源的应用必然是未来能源发展的重要方向。因此以智能电网为基础的大规模接入间歇式可再生能源的主动配电网将是未来电网发展的必然趋势,也将是我国未来大力发展的重点。由此可见对于分布式可再生能源接入主动配电网的方式及故障处理方法的研究必将是未来一段时间内的重点。

参 考 文 献

- [1] 张文亮,刘壮志,王明俊,等.智能电网的研究进展及发展趋势[J].电网技术,2009,33(13):1-11.
- [2] 基于 IEC61850 智能配电馈线终端 FTU 模型的建立[J].东北电力大学学报,2010,36(5):13-18.
- [3] 李兴源,魏巍,王渝红,等.坚强智能电网发展技术的研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(17):1-7.
- [4] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
- [5] 赵波,王财胜,周金辉,等.主动配电网现状与未来发展[J].电力系统自动化,2014,38(18):125-135.
- [6] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等.微电网技术在主动配电网中的应用[J].电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
- [7] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等.含分布式发电系统的微网技术研究综述[J].电网技术,2009,33(9):14-18+34.
- [8] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
- [9] 刘耀远,曾成碧,李庭敏,等.基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):77-82.
- [10] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8.
- [11] 关宏亮,赵海翔,迟永宁,等.电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J].电网技术,2007,31(7):78-82.
- [12] 操瑞发,朱武,涂祥存,等.双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J].电网技术,2009,33(9):72-77.
- [13] 王伟,孙明冬,朱晓东.双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J].电力系统自动化,2007,31(23):84-89.
- [14] 李国庆,王星宇,王鹤.微电网中分布式电源逆变器数字多环反馈控制方法[J].东北电力大学学报,2014,34(1):39-46.
- [15] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J].电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
- [16] 严干贵,谢国强,李军徽,等.储能系统在电力系统中的应用综述[J].东北电力大学学报,2011,31(3):7-12.
- [17] 卢芸,白钦予,路昱,等.一种微网静态电压稳定判别指标研究[J].东北电力技术,2014(5):1-6.
- [18] 张帆,李国庆,张宇阳,等.双馈感应风电机组建模控制仿真[J].东北电力大学学报,2011,31(4):80-85.

Microgrid Fault Ride-through of Active Distribution Network

Hou Xu¹, Qu Xueying², Wang He³

(1. Substation Operation and Maintenance Department, State Grid Changchun City Electric Power Supply Company, Changchun Jilin 130000; 2. Hangzhou State Power Machinery Research & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310000; 3. Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012)

Abstract: Active distribution network is the high-level technical stage that the intelligent electrical network develops. It is a distribution network, what can controls various distributional energy (distributional power source, stored energy, controllable load and demand side response). And it is an open system structure cores which can compatible other microgrid electrical networks and new energy integration technologies. Finally determined the way for microgrid fault ride-through. This article in this structure core foundation, through Photovoltaic power generation systems and Wind power generation system fault ride-through to study. At the same time, this article has carried on the modeling analysis for Microgrid fault ride-through of active distribution network.

Key words: Active distribution network; Micro-grid; Distributed generation; Fault ride-throu