

未来多源农村配电网安全与防护技术研究与探讨

黄利军, 翟登辉, 李瑞生, 任志航, 王 鹏

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 未来含大量分布式电源(Distributed Resources, DR)的农村配电网改变了传统配电网潮流单向特征, 考虑了DR及多元化负荷的接入, 由原来的“网-荷”二元结构变为“源-网-荷”三元新格局。分析了多源接入对农村配电网的系统可靠性、继电保护、开关设备、谐波、电压分布、三相不平衡、潮流分布与网损、系统运行人身和计量安全方面的影响。DR与配电网之间的交互特征主要体现在: DR如何通过电力电子设备安全灵活接入配电网、配电网如何有效应对大量DR的高占比接入。重点从DR接入农村配电网的主要形式、即插即用安全接入技术、配电网保护控制技术以及DR最佳选址定容安全设计技术方面进行了研究分析。

关键词: 多源农村配电网; 安全与防护; 即插即用; 配电网保护; DR选址定容

Research and discussion on safety and protection technology of distribution network in rural areas in the future

HUANG Lijun, ZHAI Denghui, LI Ruisheng, REN Zhihang, WANG Peng

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Future rural distribution network containing large numbers of Distributed Resources (DR) will change the unidirectional power flow characteristics of traditional power grid, and its control strategy should be changed from 'grid-load' control to 'source-grid-load' coordinated control with the integration of DR and multiple loads taken into consideration. In this paper, the impact of multi-source integration on rural distribution network including system reliability relay protection, switchgear, network harmonic, voltage profile, three-phase unbalance, power flow distribution, grid loss, system operation, personal and measurement security is analyzed. The interaction between DR and distribution network is mainly reflected in the following two aspects, one is how DR could access to distribution networks through power electronic devices safely and flexibly, and the other is how distribution networks deal with the access of DR with high capacity penetration effectively. For these issues, this paper conducts research and analysis focusing on DR plug and play safety integration technology, distribution networks protection and control technology, and DR optimal site-selection and fixed-capacity safety planning technology.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Techniques Research and Application of Distributed Substation based on Big Data and Cloud Architecture” (No. SGTYHT/16-JS-198).

Key words: multi-source rural distribution network; safety and protection; plug and play; distribution network protection; DR optimal site-selection and fixed-capacity

0 引言

传统农村配电网主要存在以下问题: 1) 装备水平低, 主变容量低、无功补偿装置落后、线路老化

且选型不标准等; 2) 网架结构弱, 多为放射式结构、架空线路供电、供电半径大、线路损耗高; 3) 管理粗放且不规范, 制度不健全、缺乏配网自动化系统、人为误操作。以上方面导致了农村配网的电能质量差、供电可靠性低以及安全隐患多等问题。

《国务院办公厅转发国家发展改革委关于“十三五”期间实施新一轮农村电网改造升级工程意见的

基金项目: 国家电网科技项目资助 (SGTYHT/16-JS-198) “基于大数据与云架构的配电主站关键技术研究与应用”

通知》等相关政策提到：到 2020 年，农村电网供电可靠率达到 99.8%，综合电压合格率达到 97.9%，户均配变容量不低于 2 kVA，开展光伏发电产业扶贫工程，首批光伏扶贫项目总装机规模为 5.16 GW。结合电网布局和农村电网改造升级，因地制宜推动接入低压配电网的分散式风电开发建设，推动风电与其他分布式能源融合发展。同时，实施新一轮农网改造升级工程，结合“农光互补”、“光伏扶贫”等分布式能源发展模式，建设可再生能源就地消纳的农村配网示范工程。

随着一系列电力政策的推出，未来农村配电网将迎来大变革。农村配电网中分布式电源的主要形式为分布式光伏、分散式风电、生物质发电、小水电，其中分布式光伏正在井喷式并网，具体见表 1。未来新型农村配电网不只是电力受端，还将是绿色、分布式电源的重要消纳地。

表 1 DR 在农村配电网的装机容量及并网电压

Table 1 DR capacity and grid voltage in the rural distribution network

分布式电源	接入形式	装机容量	并网电压
光伏	户用光伏	小于 8 kW	220 V 单相
	扶贫电站	300~500 kW	380 V 三相
	村级光伏		
	扶贫电站	10~30 MW	35 kV
	集中式光伏		
风电	分散式	小于 50 MW	35 kV 以下
	风电项目		
生物质发电	小型沼气发电工程	3~10 kW	220 V 单相
小水电	小型水电站	小于 12 MW	10 kV、35 kV 以下

1 多源接入对农村配电网系统的影响

多源农村配电网改变了传统配电网潮流单向特征，考虑了 DR 及多元化负荷的接入，由原来的“网-荷”二元结构改变为“源-网-荷”三元新格局。DR 大量接入后，与配电网之间的交互特征主要体现在以下两个方面：1) DR 如何通过电力电子设备(大多数采用)安全灵活地接入配电网；2) 配电网如何有效应对大量分布式电源的高占比接入。

下面分析多源接入对农村配电网系统的主要影响。

1.1 DR 对配电网运行控制的影响

1) DR 接入对系统可靠性的影响^[1-3]

DR 接入对系统可靠性的影响有利有弊。利主要在于 DR 可以作为备用电源，缓解用电高峰过负荷、线路过载，提高线路的输电冗余；调整 DR 输

出的有功、无功以支撑系统的电压和频率。弊端在于 DR(光伏等)的随机性和波动性可能造成负荷供电可靠性降低；DR 对配电网的多重影响使 DR 出力和接入容量受限，降低了供电可靠性；配电网网架结构改变，DR 接入对潮流方向及大小、系统稳定性等产生影响，不合理接入可能导致整个系统崩溃。

2) DR 接入对继电保护的影响^[4-9]

(1) 传统网架结构及配置改变，DR 接入后配电网变成包含大量电力电子设备的电源结构，而且潮流逆向导致保护策略失效。

(2) 故障电流改变与保护失配，DR 接入使故障电流发生改变并造成保护之间失配，导致系统中误动与拒动次数的增加，还可能降低部分保护的灵敏度。另外，系统的故障水平发生改变，比如：风电低电压穿越可能使瞬时故障转为永久性故障，使并网失败；还可能导致非同期重合，进而电网中出现过电压与过电流现象。

3) DR 及配电网故障对开关设备的影响^[10]

(1) 熔断器、断路器会遇到更高的故障电流，原因在于：DR 接入配网后，当电网故障时，会向故障点注入短路电流，增加电网的短路容量，对电气设备的动热稳定产生不利影响，对于短路容量大于等于断路器的遮断容量，会破坏断路器甚至造成爆炸。

(2) 恢复供电时，断路器重合闸后，恢复供电会产生过高的瞬时恢复电压，电压过高会加速电气设备老化，降低寿命，严重的情况会使电器烧坏。以下具体分析为何会产生过高的瞬时恢复电压。单相等值电路如图 1 所示。

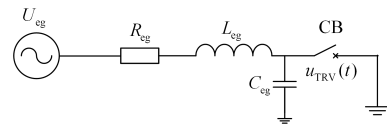


图 1 单相等值电路

Fig. 1 Single phase equivalent circuit

利用二阶电路理论，经过计算得到正常瞬时恢复电压 $u_{TRV}(t)$ 的计算公式如式(1)所示。

$$u_{TRV}(t) = \sqrt{2}U_{eg} \left(1 - e^{-\frac{R_{eg}}{2L_{eg}}t} \cos(\omega t)\right) \quad (1)$$

式中，角频率 $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{eg}C_{eg}}}$ 。

分布式电源接入之后的等效电路见图 2。

当电网单独作用时，等效电路图如图 3 所示。

此时从 CB 断路器端口来看，等效电感为 $L'_{eg} = (L_{eg} + R_{eg}) // L_{DR} < L_{eg}$ ，则

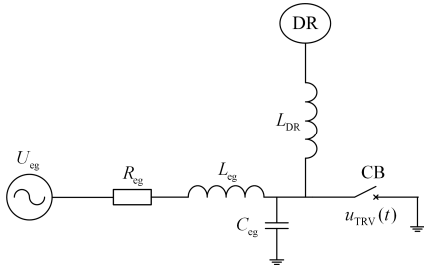


图 2 分布式电源接入的单相等值电路

Fig. 2 A single phase equivalent circuit for DR

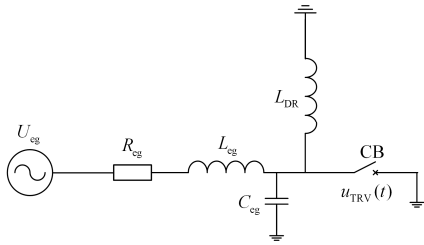


图 3 电网单独作用的单相等值电路

Fig. 3 A single phase equivalent circuit for grid

$$u_{TRV}^{eq}(t) = \sqrt{2}U_{eq}(1 - e^{-\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}t} \cos(\omega t)) > u_{TRV}(t) \quad (2)$$

当DR单独作用时, 等效电路图如图4所示。

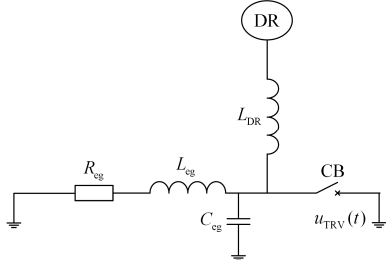


图 4 DR单独作用的单相等值电路

Fig. 4 A single phase equivalent circuit for DR

$$u_{TRV}^{DR}(t) = \sqrt{2}U_{DR}(1 - e^{-\frac{R'_{DR}}{2L'_{DR}}t} \cos(\omega t)) > 0 \quad (3)$$

利用叠加原理, 电网和分布式电源共同作用时, 实际瞬时恢复电压 $u'_{TRV}(t)$ 为

$$u'_{TRV}(t) = u_{TRV}^{eq}(t) + u_{TRV}^{DR}(t) > u_{TRV}(t) \quad (4)$$

由此可见, 实际瞬时恢复电压 $u'_{TRV}(t)$ 较 $u_{TRV}(t)$ 明显升高。

(3) DR 对系统潮流和网络损耗的影响^[11-14]

DR 接入对潮流分布的影响: DR 出力随机性与波动性使潮流的状态带有随机性, 传统的潮流计算方法不再适用。DR 接入对网络损耗的影响因素主要有 DR 容量、DR 接入位置、配电网负荷总量、DR 类型以及配电网网络拓扑, 实际网络损耗可能会增加也有可能减小。

1.2 DR 对电能质量的影响

1) DR 接入对系统谐波的影响^[15]

DR 大都经电力电子设备接入配电网, 会产生高次谐波和低次谐波, 其中高次谐波产生原因主要有 PWM 高频调制、DR(光伏等)的随机波动性使谐波增强、实际变流器设备(光伏逆变器等)一般难以额定功率运行、农配网线路长使得感抗变大, 变流器滤波参数设计前未考虑该因素。低次谐波产生原因主要有死区效应、变压器磁芯磁饱和、开关管通态压降以及器件参数漂移。

2) DR 接入对系统电压的影响^[16-19]

DR 不同的接入容量、接入位置对电网电压会产生不同的影响。DR 专线接入, 只影响变压器的电压, 对馈线处的电压基本不产生影响。DR 以 T 方式接入公共线路时, 当达到一定容量时, 配网线路末端电压有可能高于首端电压, 造成线路电压调节设备不能正常工作, 下面根据图 5 进行具体分析。

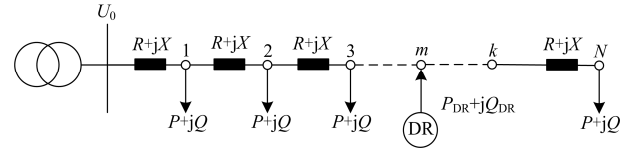


图 5 DR接入电网的典型分布图

Fig. 5 Typical distribution map of DR accessing distribution network

假设 k 点之前功率为 $(k-1)(P+jQ)$, k 点之后功率为 $(N-k+1)(P+jQ)$, m 点接入 DR 的功率为 $P_{DR} + jQ_{DR}$, U_N 为额定电压。

未接入 DR 时, 各节点电压为

$$U_k = U_0 - 0.5k(N-k-1) \times (PR + QX) / U_N \quad (5)$$

在 m 点接入 DR 时, 各节点电压为

$$\begin{cases} U_k = \frac{U_0 - 0.5k(N-k-1)(PR + QX) + k(P_{DG}R + Q_{DG}X)}{U_N}, 1 \leq k \leq m \\ U_k = \frac{U_0 - 0.5k(N-k-1)(PR + QX) + m(P_{DG}R + Q_{DG}X)}{U_N}, m < k \leq N \end{cases} \quad (6)$$

3) DR 接入对系统三相不平衡的影响^[20]

导致三相不平衡的原因主要有: 大量的小容量 DR 单相接入、缺乏实时监测和勘测、配电设备与用电负荷不匹配、设计分配负荷不当、随机因素造成(雷雨、私自更换相序等)。系统三相不平衡的危害: (1) 线路产生过欠压, 电器设备无法正常工作, 还会增加线路损耗; (2) TN-C 供电产生负序、零序电流, 影响电表计量精度; (3) 配变低压侧零序电流使设备发热绝缘老化, 加大配变损耗, 使出力减小;

(4) 正负序电压形成磁场抵消,降低电动机效率;(5) 中性线带有电流,接地电阻达不到要求,接地极和配变金属台架带电,危害人身安全。

1.3 DR 对安全与计量的影响^[21-22]

DR 接入对系统运行、人身安全以及计量安全的具体影响。1) 系统运行安全方面,DR 接入使农村配电网变为多源结构,某区域故障时,传统故障定位原理在 DR 并网时难以应用。2) 人身安全方面:孤岛效应对检修人员和用户的人身安全造成威胁;电网停电时,DR 可能会造成用户间的串供问题,对相关用户带来触电风险;用户缺乏发电设备运行管理经验,容易误操作,引发触电事故。3) 计量安全方面,DR 接入配电网,存在用户窃电的可能性,会影响计量的准确性与安全性。

2 DR 安全接入技术

2.1 DR 接入农村配电网的主要形式

DR 接入农村配电网的主要形式^[23]有直接接入、光储系统、微电网接入等。

DR 直接接入配电网的电压等级主要有 10 kV 和 380 V/220 V,这两种接入方式主要与接入容量有关,接入容量根据具体接入情况又分为专线接入和 T 接接入,如图 6 所示。

户用光伏还可以采用光储系统,其设计方式有共交流母线、共光伏侧母线以及共直流母线三种形式,其中共直流母线较为常用,具体结构框图见图 7 所示。

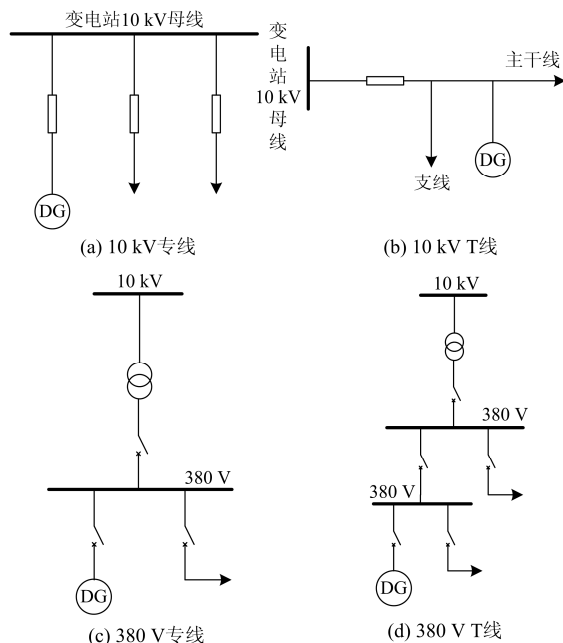


图 6 分布式电源接入配电网典型接线

Fig. 6 Typical wiring of DR accessing distribution network

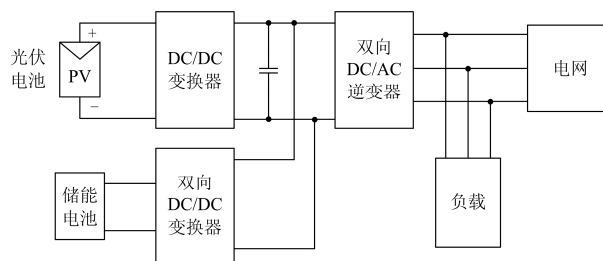


图 7 光储系统共直流母线方式

Fig. 7 Several typical connection modes of PV energy storage system

另一种较好的分布式发电有效利用方式是微电网方式,微电网既可以与配电网并网运行,也可以离网运行。微电网有交流微电网、直流微电网、交直流混合微电网三种,图 8 为交直流混合微电网结构图。

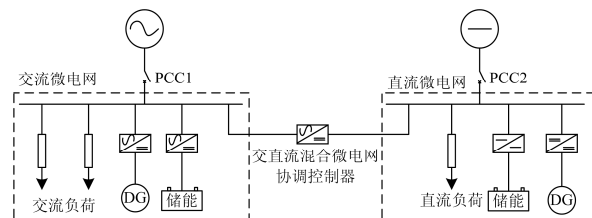


图 8 交直流混合微电网

Fig. 8 AC/DC hybrid microgrid

2.2 DR 即插即用安全接入控制技术

从 DR 接入配电网的“即插即用”(直接接入光储或微网形式)角度出发,实现功率流和信息流标准化,提高可再生能源渗透率和并网运行安全性、可靠性;DR 大都采用电力电子设备接入配电网,依靠电力电子设备本身控制实现接入电网的安全运行是个有效途径。

1) 新型主动孤岛检测技术

为解决安全并网、保证人员及用电设备安全,借用大型发电机注入式定子接地保护设计思想,采用低频电源注入的主动孤岛检测方法^[24],该方法不依赖于逆变器、通信,并且对电能质量影响小,能够实现快速无盲区检测,确保 DG 接入的安全性。

2) 预同步并网控制技术

为减少并网冲击,保证电能质量不受影响,DR 以光储或微网形式^[25-26]接入农村配网后。变流器一般具有并网和离网模式,进而满足农村用户的不间断供电(并网无缝切换)或短时断电需求;采用基于幅值和相位逐步逼近的预同步并网控制技术^[27],避免了传统 PI 控制器的比例积分参数调节难、易发散等问题,在实现即插即用“软并网”的同时,还能避免并网合闸瞬间电网的突然故障或变化等带来

的冲击问题。

3) 过电压自动抑制技术^[28]

DR 的大量无约束并网可能引起电压越限,造成 DR 频繁脱网,对电网的电能质量有不良影响,因此,根据并网点电压情况,变流器依靠自身的输出功率自动调节能力对功率进行调节,进而保证电压不越限,以避免逆变器频繁投退配电网而引起的电能质量问题,在一定程度上提高了有效发电量。

4) 高速切换控制技术^[29-31]

DR 具备有源并网、无功补偿和谐波治理多运行模式, 变流器中植入控制算法实现模式之间的高速切换, 保证系统安全运行。多模式运行及高速切换能够在一定程度上提升电能质量。

5) 自适应虚拟同步发电机技术^[32]

为实现 DR 的虚拟惯性、DR 与配电网的友好互动, 虚拟同步发电机能够实现分布式电源友好并网、微网即插即用接入, 满足分布式电源高占比接入要求; 自适应转动惯量 J 和阻尼 D 根据系统频率的波动程度自适应调整。图 9 是 VSG 的具体控制框图。

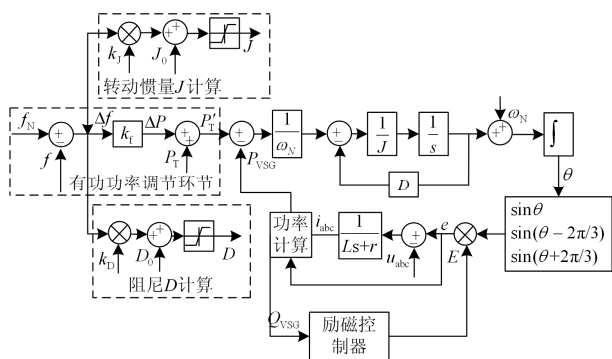


图 9 虚拟同步发电机控制框图

Fig. 9 Control diagram of VSG

6) 光储系统直流母线电压稳定控制技术

储能不仅可以作为备用电源,还可以平滑光伏功率波动,保证供电连续性,改善电能质量。光储一体机作为光伏/储能与电网的柔性接口,对直流母线电压进行稳定控制,为储能系统独立运行或接入提供安全保障,实现安全可靠供电。为实现直流母线电压的快速稳定控制,提出一种功率前馈结合电压差自适应控制技术,当光伏功率或并网功率的变化时,前馈环节能够使得蓄电池及时作出反应,其电流变化(电流大小和方向)更加敏感,加快了动态响应,更加稳定了直流母线电压,具体控制框图和仿真结果如图 10—图 12 所示,其中图 10 表明直流

母线电压能够快速稳定,波动范围很小,图 11 表明根据并网功率和实际光伏输出功率大小,系统能够对蓄电池自动快速地进行充电。

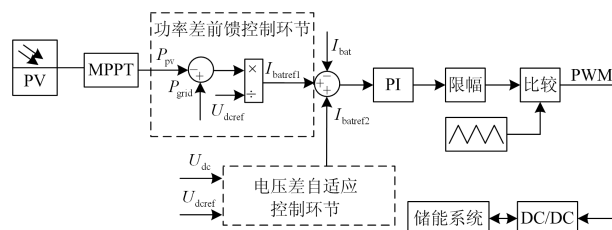


图 10 直流母线电压稳定控制框图

Fig. 10 Control diagram of DC bus voltage

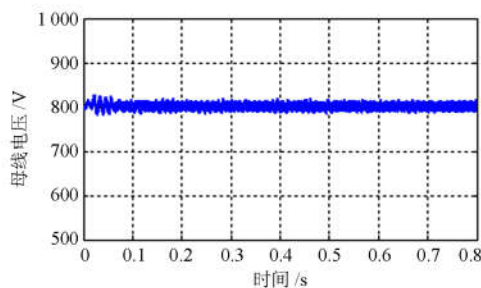


图11 直流母线电压仿真波形

Fig. 11 Simulation wave of DC bus voltage

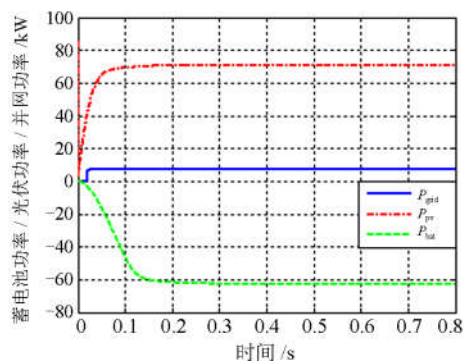


图12 蓄电池、光伏及并网功率仿真波形

Fig. 12 Simulation wave of battery /PV/grid power

7) 户用光储一体机系统集成技术

未来农村户用光伏将是一个重要发展方向，储能系统能够保证供电连续性或无电区的独立供电，光储一体机作为核心电力电子设备，为保障接线安全，实现系统集成以做到即插即用是非常必要的，具体方法是：光伏板带旁路 SiC 二极管，DC/AC 单元和储能 DC/DC 单元均采用三电平拓扑，损耗小，效率高；采用即插即用的标准化接口、可热插拔的强弱电一体化连接器，具体见图 13，采用模块化设计，能够灵活组合，方便操作。



图13 强弱电一体化即插即用连接器

Fig. 13 HV/LV integrated plug terminal

3 DR 接入农村配网安全保护技术

3.1 架空线路配电网的纵联保护技术

为解决架空线 ADN 保护^[31]问题, 采用 EPON 通信方式, 利用 PON 传输 GOOSE 机制, FTU 传输启动及方向元件, 由集中式纵联方向保护实现配电网保护。能够很好地满足 AND 接入 DG 对保护的要求。另外, 随着 IPV6、物联网、云存储、5G 通信的发展, 移动通信方式也将可能应用于配电网保护。

3.2 基于 DR 最佳选址定容的安全设计技术

DR 接入农村配电网需要考虑接入位置, 接入容量对配电网可靠性的影响, 主要分析 DR 最佳选址定容的单点接入原则。

1) DR 安装容量确定, 则线损最小时的接入位置选取原则: 假设负荷均匀分布, 线路单位阻抗为定值, DR 接入容量 P_{DR} 为定值, 则线损 ΔP_{L_0} 为

$$\Delta P_{L_0} = \frac{P_{L_0}^2}{U_N^2} R_1 + \frac{(P_{DR} - P_{L_0})^2}{U_N^2} R_2 = \frac{3R}{U_N^2} (P_{L_0} - \frac{P_{DR}}{2})^2 + \frac{P_{DR}^2 R}{4U_N^2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当 $P_{L_0} = 0.5P_{DR}$ 时, 最小线损

$\Delta P_{L_0} = \frac{P_{DR}^2 R}{4U_N^2}$, 具体如图 14 所示。

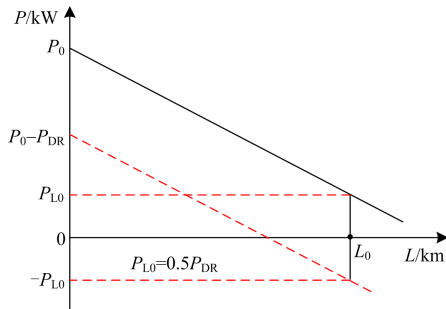


图14 DR容量确定, 线损最小的接入位置

Fig. 14 DR position when line loss is minimum and

DR capacity is determined

2) DR 接入位置确定, 则线损最小时的安装容量选取原则: 假设负荷均匀分布, 线路单位阻抗为定值, 电网原总输出功率为 P_0 , L_0 为固定接入位置点。由式(7)结论得

$$P_{DR} - P_{L_0} = 0.5(P_0 - P_{L_0}) \quad (8)$$

则 ΔP_{L_0} 值最小时: $P_{DR} = 0.5(P_0 + P_{L_0})$, 具体如图 15 所示。

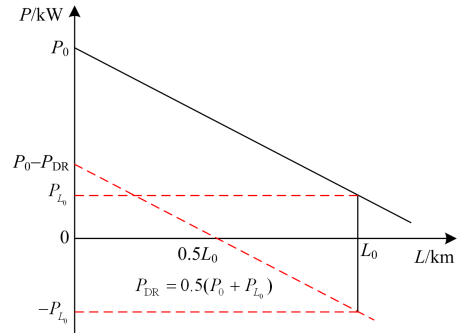


图15 DR接入位置确定, 线损最小时的接入容量

Fig. 15 Access capacity when DR position is determined and line loss is minimum

4 结语

1) 本文主要阐述了未来多源接入对配电网运行控制的影响、对电能质量的影响、对安全与计量的影响。

2) 本文对 DR 接入农村配电网的主要形式、DR 即插即用安全接入技术、配电网保护控制技术等进行了分析研究, 为未来多源农村配电网的有序发展提供了一定参考。

参考文献

- [1] XU D, GIRGIS A A. Optimal load shedding strategy in power systems with distributed generation[C] // Proc of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Asia Pacific, January 28–February 1, 2001, Columbus, OH, USA: 788-793.
- [2] 武志刚, 程鲁文, 张尧, 等. 智能微网及其可靠并网研究[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(4): 22-27.
WU Zhigang, CHENG Luwen, ZHANG Yao, et al. Study on smart microgrid and reliable grid-connected microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(4): 22-27.
- [3] 侯汝锋, 陈志钊, 吴轲. 分布式电源接入电网的孤岛划分策略及其对配电网供电可靠性的影响评估[J]. 广东电力, 2012, 25(1): 64-69.
HOU Rufeng, CHEN Zhizhao, WU Wei. Isolated island

- partitioning strategy for distributed generation access to power grid and its impact on power supply reliability of distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(1): 64-69.
- [4] KAUHANIEMI K, KUMPULAINEN L. Impact of distributed generation on the protection of distribution networks[C] // 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, April 5-8, 2004, Amsterdam, Netherlands: 315-318.
- [5] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
- WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [6] 王菁, 邵如平, 穆秀云, 等. 含分布式电源的配电系统保护方案[J]. 低压电器, 2012(10): 14-17.
- WANG Jing, SHAO Ruping, MU Xiuyun, et al. Relay protection scheme for distribution system with distributed generations source[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(10): 14-17.
- [7] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 基于供电可靠性的配电网继电保护规划[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2186-2191.
- LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Planning of protective relay coordination for power distribution systems based on service reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2186-2191.
- [8] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
- WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [9] 张凯翔, 张肖青. 分布式电源对配电网继电保护的影响分析[J]. 供用电, 2017, 34(8): 47-51.
- ZHANG Kaixiang, ZHANG Xiaoqing. Analysis of the influence of distributed generation on relay protection of distribution network[J]. Distribution Utilization, 2017, 34(8): 47-51.
- [10] 葛清, 应康, 夏翔, 等. 分布式发电对电压跌落及失电损失分摊的影响[J]. 华东电力, 2007, 35(4): 33-37.
- GE Qing, YING Kang, XIA Xiang, et al. Effect of distributed generation on voltage drop and loss allocation[J]. East China Electric Power, 2007, 35(4): 33-37.
- [11] ACKERMANN T, KNYAZKIN V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects[C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, October 6-10, 2002, Yokohama, Japan: 1357-1362.
- [12] PONGPORNUP V. Impact of non-utility induction generator to distribution network[C] // Proceedings of IEEE/EPES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, Asia Pacific: 1352-1356.
- [13] 姜凤利, 朴在林, 方晶晶. 考虑分布式发电的农村弱环配电网潮流计算方法[J]. 中国农村水利水电, 2014(12): 152-156.
- JIANG Fengli, PIAO Zailin, FANG Jingjing. Power flow algorithm for weakly meshed rural power distribution systems with distributed generation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(12): 152-156.
- [14] 任泳橙. 分布式光伏并网对配电网潮流和网损的影响及对策[J]. 供用电, 2017, 34(2): 64-68.
- REN Yongcheng. The influence of distributed photovoltaic grid-connected on power flow and network loss of distribution network and its countermeasures[J]. Distribution Utilization, 2017, 34(2): 64-68.
- [15] 王铃, 徐备, 张师. 分布式储能对配电网电压稳定的影响分析[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 48-51.
- WANG Jin, XU Bei, ZHANG Shi. Impact of distributed energy storage on distribution network voltage stability[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 48-51.
- [16] 姜凤利, 朴在林, 吴硕, 等. 分布式发电对农村配电网电压分布和网损的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(2): 200-204.
- JIANG Fengli, PIAO Zailin, WU Shuo, et al. Impact of distributed generation on voltage profile and losses of rural power distribution networks[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(2): 200-204.
- [17] 刘健, 王魁元, 张志华. 利用自然适应性解决农村配电网电压质量问题的优化规划研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(15): 28-33.
- LIU Jian, WANG Kuiyuan, ZHANG Zhihua. Optimal planning of improving the voltage performance for rural distribution networks by utilizing the nature adaptability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(15): 28-33.
- [18] 陈晓玲. 农村配电网接线方式优化分析[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 187-188.
- CHEN Xiaoling. Optimization analysis on connection mode of rural distribution network[J]. Telecom Power Technologies, 2016, 33(6): 187-188.
- [19] 黄桂兰, 林韩, 蔡金锭. 农村配电网低电压治理措施研究[J]. 电气技术, 2015, 16(11): 64-67.

- HUANG Guilan, LIN Han, CAI Jinding. Measures of low voltage for rural power distribution network[J]. Electrical Engineering, 2015, 16(11): 64-67.
- [20] 龙旭雲, 吴胜利. 农村配变台区三相不平衡的危害及抑制方法[J]. 江西电力, 2016, 11(增刊): 14-17.
- LONG Xuyun, WU Shengli. Rural with variable area of three phase unbalanced harm and suppression method[J]. Jiangxi Electric Power, 2016, 11(S): 14-17.
- [21] 王鹏, 林涛, 纪坤华. 分布式光伏电源接入配电网的安全防护[J]. 华东电力, 2013, 41(11): 2344-2347.
- WANG Peng, LIN Tao, JI Kunhua. Safety protection for distributed PV power access to low-voltage distribution network[J]. East China Electric Power, 2013, 41(11): 2344-2347.
- [22] 陈黎军. 分布式光伏发电并网对配电网安全的影响分析[J]. 电力安全技术, 2014, 16(8): 13-17.
- CHEN Lijun. Analysis of the influence of distributed photovoltaic power generation grid on the safety of distribution network[J]. Electric Safety Technology, 2014, 16(8): 13-17.
- [23] 李瑞生. 分布式电源并网运行与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [24] 李瑞生, 郭宝甫, 曾正. 低频电源注入式主动孤岛检测方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 114-120.
- LI Ruisheng, GUO Baofu, ZENG Zheng. Active islanding detection scheme based on low-frequency power supply injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 114-120.
- [25] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [26] 蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 等. 新型交直流混合微电网结构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 147-154.
- CAI Bingqian, JIA Lihu, ZHU Yongqiang, et al. New architecture design for hybrid AC/DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 147-154.
- [27] 翟登辉, 郭宝甫, 王伟. 基于幅值和相位逐步逼近的微网预同步方法研究[J]. 电力学报, 2016, 31(2): 106-110.
- ZHAI Denghui, GUO Baofu, WANG Wei. Research on pre-synchronization method for microgrid based on successive approximation of voltage amplitude and phase[J]. Journal of Electric Power, 2016, 31(2): 106-110.
- [28] 李瑞生, 翟登辉. 光伏 DG 接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 62-68.
- LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Research on the over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic sources accessing to distribution network or microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 62-68.
- [29] 李瑞生, 徐军, 翟登辉, 等. 一种电力电子转换装置运行模式超高速切换方法, 中国专利: ZL201510290495.0[P]. 2015-11-11.
- LI Ruisheng, XU Jun, ZHAI Denghui, et al. Power-electronic-conversion-device operation-mode ultra high speed switching method, Chinese Patent: ZL201510290495.0[P]. 2015-11-11.
- [30] 康成功, 李猷伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.
- KANG Chenggong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [26] 李瑞生, 翟登辉. 具有转动惯量和阻尼自趋优的虚拟同步发电机方法, 中国专利: ZL201510500003.6[P]. 2015-08-14.
- LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Overrunning virtual synchronous generator (VSG+) method with rotary inertia and damping self-optimization-trending, Chinese Patent: ZL201510500003.6[P]. 2015-08-14.
- [27] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.
- LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-05-03

作者简介:

黄利军(1969—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、高压直流输电; E-mail: lijunhuang@xjgc.com

翟登辉(1984—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网、分布式发电与微电网技术; E-mail: zdh-11123@163.com

李瑞生(1966—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网技术。E-mail: ruishengl@139.com

(编辑 姜新丽)