

配电网智能化过程中分布式电源接入系统研究

分布式电源作为新的发电模式,对于促进能源的可持续发展具有重要的意义。随着配电网形式的逐渐改变,智能配电系统应运而生,分布式电源的接入与运行也同样产生了深刻变化。本文对分布式电源接入系统若干问题进行研究,首先对分布式电源接入对系统带来的影响进行了分析,其次,对分布式电源准入容量、最优容量及接入位置等相关定容及选址问题进行了探讨;第三,对微网下分布式电源的控制技术进行了总结,最后,在主动配电网研究背景下,从不同层面上对分布式电源的接入问题进行了研究。分布式电源巨大的发展潜力对解决能源问题、环境问题、经济问题具有重要意义,未来应从技术研发、政府激励等方面促进分布式电源的发展。

詹 胜 邵建设/黄冈师范学院电子信息学院



詹 胜/工学学士

日益加剧的温室效应、严重的环境污染、传统能源的短缺及电力需求的持续性上升,给传统发电带来了挑战。分布式电源(Distribution Generation, DG)利用清洁能源发电、接入方式分散灵活,为传统配电网提供了有效的补充,成为目前电力领域研究的热点问题^[1]。随着节能减排的进一步提倡,分布式发电越来越得到重视,我国政府相继出台不同政策指导和扶持分布式发电。目前已形成“自给自足、余量上网”的分布式电源接入局面。分布式电源的接入将改变配电网潮流的基本布局,并在电能质量、继电保护和供电可靠性等方面带来影响。

近年来,随着分布式电源接入、柔性负荷、储能装置及智能开关的快速发展,配电系统的结构也在发生深刻的变化,微电网的接入、主动配电网的产生

为智能配电网的大力发展提供了有效支撑^[1-2]。为解决分布式电源的接入问题,国内外相关机构也进行着大量的研究^[4],我国也相继启动主动配电网的专项课题研究。随着配电网系统日趋智能化,灵活、可靠和高效的配电网架构能实现对分布式电源接入的主动控制、管理等。

本文从若干方面对分布式电源的接入问题进行了研究。首先,从电能质量、继电保护、可靠性、网损和系统规划等方面分析了分布式电源接入给配电网带来的影响;其次,从准入容量计算、最优定容及选址两个方面对分布式电源的定容及选址问题进行了探讨;再次,从三个方面对微电网下的分布式电源控制技术进行了总结;最后,结合目前主动配电网的相应研究内容,从不同层面对分布式电源的接入问题进行了研究,主要涉及状态评估、主动配电网系统规划、能量优化调度及控制等层面。分布式电源的发展,为节能减排的实现提供了强有力的保障,深入研究分布式电源的接入问题,将会进一步促进未来分布式电源的发展及应用。

DG接入对配电网的影响性研究

配电网是电力系统的重要组成部分,承担着向用户提供优质、可靠和稳定电能的重任。传统配电网以辐射状、环网等供电结构向用户分配电能,系统供电可靠性以满足“N-1”校验为判定方法。分布式电源的产生,作为接入容量小、方式灵活的供电单元,分布

关键词/Keywords

分布式电源·
接入·
主动配电网·

式电源在缓解能源消耗、降低环境污染方面具有重要作用。随着分布式电源的逐渐接入,传统的配电网出现多电源供电的局面,分布式电源的接入会给电能质量、系统保护、系统可靠性、系统网损和系统规划等方面带来影响,合理的分布式电源接入则将为传统配电网提供有效的补充,反之则会产生较为严重的影响。含分布式电源的配电网网络如图1所示。

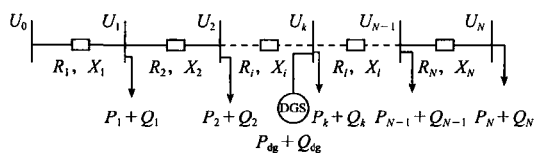


图1 含DG的配电网网络

1. 电能质量影响

分布式电源接入对接入点电压会产生影响,采用灵敏度分析方法可以对分布式电源接入前后的节点电压的波动进行分析^[5]。分布式电源不同接入容量及位置对节点电压的影响不尽相同,若分布式电源接入容量过大,则接入点出现过电压现象,从接入位置来看,分布式电源分散接入对电压的支撑效果要优于分布式电源的集中式的接入^[6];另一方面,不同类型的DG设备对电压稳定性的影响也存在差异,II型和III型DG设备对电压的改善效果比I型DG设备要明显^[7]。分布式电源设备多采用PWM控制技术,因而所产生的谐波不可避免地流向了配电网系统,对配网系统产生了谐波污染。分布式电源接入产生的谐波电流大部分都流向了公共耦合点,而谐波电流受分布式电源与公共耦合点之间阻抗的影响很大^[8]。DG以分散、灵活的方式接入配电网有利于改善系统电能质量,如提高电压稳定性;但DG的不规则起停会导致输出功率波动,造成配电网电压闪变,大量电力电子装置的应用也会带来谐波污染等问题。

2. 继电保护影响

传统配电网继电保护主要根据系统网络进行设计,而目前传统配电网主要以辐射型供电网络为主,且多为单一电源。分布式电源接入后会形成双端或多端电源供电,系统潮流及故障电流

会发生根本变化,接入分布式电源后的继电保护设置和动作值的整定将会变得困难。分布式电源的接入会导致非故障线路保护误动作或保护拒动作;增大保护动作时限,导致故障点持续电弧自动重合闸失败等问题^[9-10]。文献[11]选取了4个节点进行分析,指出当分布式电源下游发生短路故障时,对下游的保护测量电路会产生助增的作用,而对上游的保护测量电流则会产生汲流的作用,因此会增大下游的保护范围而可能引起误动作,对上游则会引起拒动作,含DG的系统保护影响等效电路图如图2所示。在系统发生故障时,由于分布式电源对短路电流具有助增及汲流的作用,导致故障电流可能增大也可能减小。故障电流的大小将会改变系统保护的灵敏度和范围,给各个保护装置之间的相互配合带来了困难,分析分布式电源接入对系统保护的影响有利于后期相应保护方案及相关保护设备的制定。

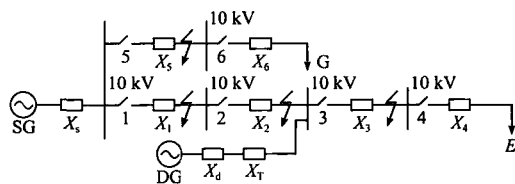


图2 DG对系统过电流保护影响分析等效电路图

3. 可靠性影响

随着用电负荷对供电可靠性要求的进一步提高,配电网供电可靠性问题越来越值得重视。分布式电源的接入引起了供电模式的变化,进而影响着系统供电可靠性。对供电可靠性的分析方法主要有区间分析法^[12]、最小路径法^[13]和序贯蒙特卡洛法^[14]等。文献[15]分析了分布式电源接入和恶劣天气等两个因素对配电网可靠性的影响,分析表明,恶劣天气对配电网运行可靠性的影响极大,分布式电源的合理接入能够有效地提高配电网的供电可靠性,但缺少对分布式电源特性的综合考虑;文献[16]全面考虑了分布式电源的发电特性,对分布式电源的功率输出、设备状态及负荷的随机需求等因素对配电网可靠性的影响进行了深入分析。分布式电源作为用户备用电源,在配电网系统因故障停电时仍可为用户提供供电,有

利于提高系统可靠性水平；然而，分布式电源受环境影响极大，起停的间接性和随机性，与系统保护设备配合的不衔接性会降低供电可靠性。

4. 网损影响

配电网系统的网络损耗与系统潮流有关，而分布式电源接入配电网后对系统的潮流分布必然会产生影响。分布式发电受气候等因素影响极大，存在明显的随机特性和季节性，同时输出电量会因外界众多因素变化而产生变化。因此，分布式电源接入后配电网的潮流也具有随机性，配电线路上的负荷潮流变化也较大。因此，分布式电源接入的不同会对系统网损产生不同的影响，可能增加系统网损也可能降低系统网损^[17-18]。文献[19]提出包含网损分析率和网损贡献度两个指标在内的网损分析模型，有助于掌握分布式电源并网后引起的损耗趋势和规律，对工程具有相应的指导价值。

5. 系统规划影响

传统的配电网规划以负荷预测为基础，通过结合现有网络的基本情况，确定最优的系统规划建设方案。在规划过程中，应能同时满足系统负荷增长的需要及对安全可靠供电的需要，使得系统规划建设的投资及运行费用最小。随着分布式电源的不断接入，原有传统配电网的规划将发生变化，分布式电源的接入增加了负荷预测的不确定性、提高了配电网布置的难度及增加了配电网规划方案的多样化^[20-21]。如何协调高效地利用各类分布式电源成为迫切需要解决的问题。

分布式电源定容及选址研究

1. 准入容量研究

分布式电源的准入容量体现了配电网对于分布式电源分散注入功率的最大接纳能力。准入容量的确定与传统配电网的电压、系统保护、稳定性和可靠性等一系列的运行参数有关^[22]。

(1) 从系统电压约束角度考虑

根据我国电网相关规定，10 kV与380 V电网节点电压不得超过1.07 (pu)。一种较为实用的方法则是将馈线负荷进行规律性分布，通过理论计

算给出分布式准入容量与接入位置的简化计算函数^[23]，但实际负荷的分布呈现出不规则性；通过建立相应的优化模型，可以较为准确地求解电压约束下的分布式电源准入容量^[24-25]。

(2) 从系统保护约束角度考虑

系统短路电流的流向及分布随着分布式电源的接入而发生变化，原有系统保护装置的灵敏度会降低，最后引起保护的误动作或拒动作。传统配电网保护配置的改变与否对于分布式电源准入容量的计算具有一定的影响，在保持原有配电网保护配置不变的情况下，文献[26-27]通过相应的理论分析及建模，给出了考虑保护约束的分布式电源准入容量；而文献[28]在分析传统三段式电力保护整定中关键变量之间相互关系变化规律的前提下，讨论了分布式电源的准入容量。

(3) 从谐波约束角度

分布式电源中大量电力电子器件的应用，增加了配电网中的非线性负荷。如果分布式电源注入的谐波电流足够大，则配电网的谐波畸变会超过限制。在谐波约束下，应首先对分布式电源的谐波发射机理进行分析，以谐波限值为约束求解分布式电源的准入容量^[29-30]。

(4) 从起停约束及其他角度

分布式电源的起停受外部因素影响极大，发电的随机性大大增加了分布式电源接入配电网的复杂性。文献[31]基于分布式起停对配电网传统控制的影响，同时考虑到实际工程中所关心的分布式电源处于最恶劣的情形以及分布式电源的起停策略，根据至少传输容量的思想给出了至少准入容量计算方法。其他约束条件还包括分接头振荡约束^[32]、故障定位方案^[33]等。

求取分布式电源的准入容量对于分布式电源接入配电网具有重要的指导意义。从某个约束条件进行考虑则显得相对单一，因此，后续研究需探讨如何在多种约束条件下计算出最为适宜的分布式电源准入容量。

2. 优化定容及选址研究

准入容量下的分布式电源接入无法保证系统处于最佳经济、安全和可靠的运行，如何确定

最优的接入容量和位置则是另一方面重点研究内容。研究分布式电源最优接入容量及位置时,应先确定相应的优化目标、建立相应的理论优化模型,然后通过相应的计算方法得出最优量。

(1) 优化模型研究

国内外学者对分布式电源的优化配置模型进行了大量研究,本文从费用角度、降损角度和可靠性角度对分布式电源接入的优化模型进行分析。

以年费用最小为优化目标模型^[34],优化模型中考虑到了环境因素以及负荷的时序特性,有助于实现经济性与环保性之间的平衡。

$$\min C = C_{DG} + C_f + C_{loss} + C_e \quad (1)$$

式中, C_{DG} 为 DG 投资费用; C_f 为 DG 产生的燃料费用; C_{loss} 为网络损耗费用; C_e 为环境污染赔偿费用。

以系统网络损耗最小为优化目标模型^[35]。计算公式为

$$\min f = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i \quad (2)$$

式中, f 为系统网络损耗函数; P_i 、 Q_i 为支路 i 末端的有功与无功负荷; U_i 为支路 i 末端的电压; R_i 为支路 i 的电阻; n 为支路数。

文献[36]考虑系统网损指标下,同时考虑到节点电压指标及线路电流指标,优化模型为

$$\min F(x) = [I_p(x), I_v(x), I_c(x)] \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_p = \frac{P_{LDG}}{P_L} \\ I_v = \frac{1}{N_N - 1} \sum_{i=1}^{N_N-1} \frac{|V_i - V_0|}{V_0} \\ I_c = \max_{l=1}^{N_L} \left(\frac{I_l}{I_{lmax}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, I_p 为系统网损评价指标; P_{LDG} 和 P_L 分别为安装 DG 和未安装 DG 电网的网损值; I_v 为首节点电压与电网其他节点电压偏差的平均值; N_N 为节点总数; V_i 、 V_0 分别为第 i 个节点和首节点的电压幅值; I_c 为线路热稳定裕度; N_L 为线路总数; I_l 、 I_{lmax} 为第 l 条线路流过的电流幅值和最大电流幅值。

考虑到电源的时序特性,建立的计及电能损耗及可靠性的多目标优化模型为^[37]

$$\begin{aligned} \min f_1 &= \sum_{n=1}^{N_s} w_n C_{lossn} \\ \min f_2 &= \sum_{n=1}^{N_s} w_n C_{Relin} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, N_s 为电源出力时序特性曲线和负荷时序特性曲线所构成的场景数; w_n 为场景 n 的权重; C_{lossn} 为电网在场景 n 下的电能损失费用; C_{Relin} 为场景 n 下配电网的年缺供电量费用。

在目前优化模型的研究中,大部分模型目标考虑较为单一,仅仅从某个问题进行优化。而分布式电源定容及选址是一个复杂的寻优问题,未来研究应综合考虑多个因素对分布式电源定容及选址的影响。

(2) 求解方法研究

在基于建立的优化模型的基础上,如何求解优化问题值得进一步地分析研究。传统的求解方法通常对所研究的问题进行简化,研究负荷规律性分布下的分布式电源接入,如“2/3”接入准则^[38]、解析法^[39]和微增率法^[40]等。

智能优化算法的产生,对于求解复杂的非线性问题,多目标优化问题提供了良好的解决途径。国内外学者对求解分布式电源优化选址及定容的智能算法进行了研究。遗传算法以其良好的全局收敛能力及较强的鲁棒性,广受研究者的关注,但存在早熟的问题,通过与其他算法结合^[41]、改进编码排序^[42]等手段能有效地提高遗传算法的搜索效率,避免陷入局部最优解。

粒子群算法相对遗传算法编程实现简单,通过与其他算法结合^[43]、改进粒子群算法相关计算参数(如惯性权重系数,学习因子)^[44]等方式有助于提高粒子群算法的收敛准确度和速度。

其他智能优化算法如萤火虫算法^[45]、人工蜂群算法^[46]、细菌觅食算法^[47]和人工鱼算法^[48]等均应用于分布电源接入优化模型的求解中,并取得了较好的优化求解效果。

微电网下分布式电源控制技术研究

微电网整合了分布式发电的优势,将风能、太阳能和燃料电池等微型电源及相应负载组成单

一可控系统,为用户提供电能及热能,微电网既能并网运行亦可孤岛运行,是单一分布式电源接入系统的进一步升华。微电网控制技术的研究有利于实现分布式电源的有效接入。

1. 主从控制

主从控制是针对孤岛运行模式下的微电网,提出的基于 V/f 控制策略的控制方法。参考电压和频率由一个或有限个微电源提供,起到对微电网系统电压和频率的支撑,并通过对参考功率的跟踪控制实现电力供需平衡。主从控制框图如图3所示。

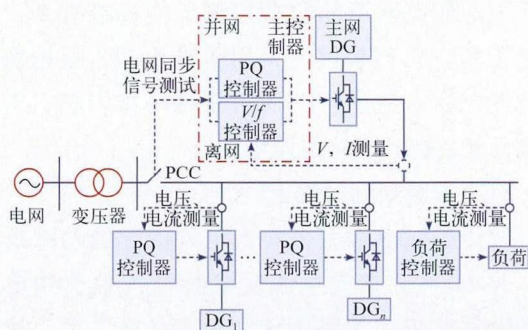


图3 主从控制框图

主从控制结构可包括单一主从控制结构和多个主从控制结构,该两种模式下均可对微电网能源进行管理和控制,实现微电网的黑启动等^[49]。主从控制方式的实现关键在于相应控制器的设计,如对 V/f 控制单元采用基于下垂特性的多环反馈控制,对PQ控制单元采用PQ解耦的电流控制^[50],基于 V/δ 的下垂控制^[51]等方法可实现对控制器的良好操作。但主从控制策略存在从电源对主电源依赖性过高;依赖于通信并存在通信成本高、复杂度高和可靠性约束等缺点。

2. 对等控制

对等控制是指各DG之间不存在从属关系,系统中所有DG均采用基于下垂控制法参与有功和无功的调节。对等控制框图如图4所示。

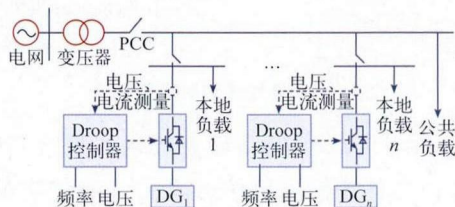


图4 对等控制框图

对等控制策略下,微网控制器通常采用 P/f 和 Q/V 的下垂控制方法,在此基础上可相应增加内环电压控制,以减少无功电流^[52]。改进的下垂控制方法如基于虚拟电阻的下垂控制方法^[53],模式自适应的下垂控制方法^[54]等在提高控制准确度上更具有优势。对等控制方法也同样存在问题:①由于负载的瞬时变化,使得稳态误差不能为零;②不能协调非线性负载造成的谐波分布;③下垂特性方法不能很好地解决系统无功功率受线路阻抗的影响;④对线性和非线性负载的系统,当拓扑结构变化引起控制模式改变时,对等控制方式将不再适用。

3. 多代理控制

随着人工智能的迅速发展,多代理系统(Multi-Agent System, MAS)得到广泛的应用。Agent适合微网分散而复杂的控制需要。文献[24]提出包含配电网运行商/市场运行商-微网中心控制器-本地控制器(Distribution Network Operator/Market Operator-MicroGrid Central Controller-Local Controllers, DNO/MO-MGCC-LC)的3层控制策略,系统控制结构如图5所示。将LC Agent改造成智能负载控制器,通过无线通信可实现与MGCC的协调控制^[56]。

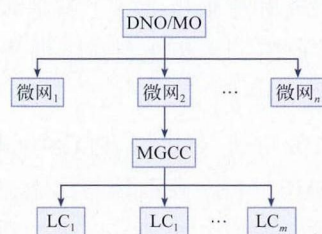


图5 多代理控制框图

但集中性MAS控制结构对MGCC具有依赖性,无法实现Agent自我决策功能。文献[57-58]对无中心控制的Agent的分散性MAS系统进行了探讨,通过相邻单元之间的互信,实现Agent的自我决策控制。

目前多代理技术在微网中的应用多集中于协调市场交易、供电恢复和实现能量管理等方面,还未深入到对微网中频率、电压及系统稳定性等控制层面上。

AND下分布式电源接入研究

主动配电网 (Active Distributed Net, AND) 作为智能配电网未来的发展趋势, 是可以实现分布式电源在配电网中广泛接入及高度渗透的重要技术手段^[59-60], 与主要关注用户侧的微电网不同, AND主要面向由电力企业管理的公共配电网, 是智能配电网技术发展到高级阶段的产物, 是一种兼容电网、分布式发电及需求侧管理等多类型技术的全新开放式配电系统体系结构。根据CIGRE C6.11的工作报告, 主动配电网可定义为: 可以综合控制分布式资源 (例如分布式能源、柔性负载和储能等) 的配电网, 可以使用灵活的网络调节技术实现潮流的有效管理, 分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担对系统一定的支撑作用。

1. 在状态评估层面上

状态评估主要包含对负荷数据、DG实时输出功率和储能装置运行状态等的分析与评估。而AND的负荷预测、发电预测与传统配电网的预测方法存在差异。主动配电网下负荷的种类增多, 负荷特性明显不一, 如电动汽车的负荷特性与其充电模式密切相关, 目前常见的电动汽车充电模式有快充、慢充和更换电池等。其他因素如外界环境因素、政府机制和历史负荷数据均对AND的负荷预测带来影响。

灰色层次分析法 (Gray Analytic Hierarchy Process, GAHP) 将灰色理论与层次分析法进行结合, 可对需考虑的多种影响因素的数据进行融合, 通过灰色关联分析及层次权重系数确定, 可得出较为准确的预测值。因此, 可探讨GAHP在AND负荷预测中的应用, 所建AND负荷预测层次结构如图6所示。负荷种类分为不可控负荷、可控负荷及可调负荷, 可控负荷涉及协议停用电负荷、更换电池型式的电动汽车等; 可调负荷则是根据自身用电需要及节约费用的角度出发, 如快充/慢充型电动汽车。政府引导机制可分为电价调整策略及需求侧响应, 用电激励政策能很好地实现消峰填谷。外界环境对负荷预测存在较大的影

响因素, 譬如天气环境影响用户的用电需求、地理环境影响用电负荷的分布情况。

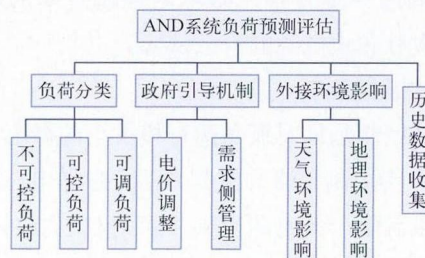


图6 AND负荷预测评估层次结构图

主动配电网下的负荷预测工作日趋复杂, 如何基于历史负荷数据, 采用引导机制, 根据负荷用电的需求响应特性, 同时兼顾环境影响, 对于正确预测负荷具有重要作用。

2. 在系统规划层面上

与传统配电网下分布式电源的定容与选址不同, AND下分布式电源发电特性、负荷用电需求和储能装置配置等不确定因素较多。由上述研究可知, 传统配电网下分布式电源的定容与选址通常基于某个特定的目标, 如从费用最低角度、网损最小角度或者系统可靠性最高的角度等。而AND下的系统规划对分布式电源的定容与选址提出了更多的挑战, AND规划中不仅需要考虑到原有配电网的规划、DG的优化配置, 还需要兼顾考虑储能设备的定容与选址问题。传统单一的规划实现目标, 逐渐演变成以追求实现分布式电源损耗小、系统供电可靠率高以及能源利用率高的多目标规划问题。AND系统规划所需考虑因素如图7所示。

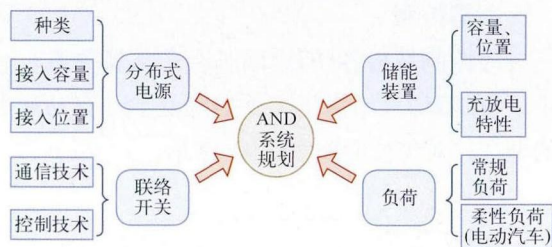


图7 AND系统规划影响因素

AND与传统配电网最大的区别在于AND的主动性, 与传统配电网中分布式电源优化配置不同, AND中分布式电源的接入则需要考虑更多影

响因素。配电网下储能装置增加,不同电压等级下储能装置如何配置对实现负荷的功率平衡具有重要影响。如储能系统的充放电特性及联络开关之间的相互配合。因此,分布式电源在AND中的选址及定容问题则显得更加复杂,未来需进一步研究相应优化模型及其求解方法。

3. 在能量优化调度层面上

主动配电网不仅包括可控分布式发电单元,还有兼具充放电特性的储能系统以及配电网中的联络开关。因此,主动配电网的优化调度模型与传统配电网下的优化调度模型不同,存在控制变量多、约束条件多和目标函数复杂等特点。主动配电网更多的是关注整个周期内的系统最优化,并兼顾系统内储能装置的能量守恒。一种主动配电网的优化目标函数可表示为

$$\min F = \sum_{i=1}^k [\sum_{g=1}^l C_g(t)P_g(t)\Delta T + \sum_{i=1}^n C_i(t)P_{DG-i}(t)\Delta T] \quad (6)$$

式(6)考虑到了不同时间内的电价成本及不同分布式电源的发电成本,从本质上能反映出优化调度分布式可再生能源以及储能充放电策略合理化带来的收益。未来研究中应考虑到储能装置模式切换所带来的损耗及联络开关的折损费用等。

另一方面,随着电动汽车的普及,不同充电模式对系统能量的优化管理带来了困难,为了避免功率缺额,需要加强对电动汽车的主动性管理。用户互动是实现需求侧管理与电网能量优化调度的另一有效手段,随着信息技术的普及,用户参与互动程度将得到进一步的提升,对AND的能量优化管理具有重要意义。

4. 在控制层面上

与微电网的控制方式相比,AND的控制方式则更加复杂,负荷的多样性、联络开关的智能性和通信手段的复杂性等,无疑增加了AND控制的难度,AND常见的三种控制方式包括集中式、分散式及混合分层式。控制方式为相应控制策略的选择及研究奠定了基础,文献[61]考虑到多时间尺度,提出了基于AND的分布式电源协调控制框架及相应的自治控制策略,通过控制策略的实现达到AND对于分布式电源的全局优化控制,系统协

调控制框架如图8所示。

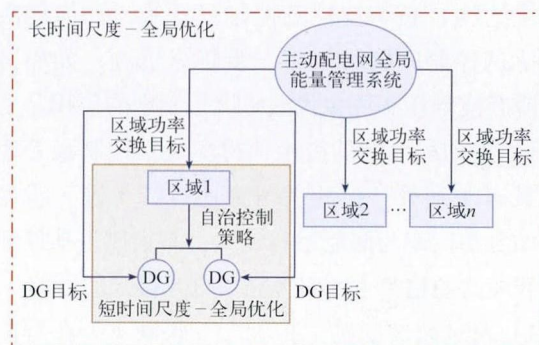


图8 多时间尺度下主动配电网电源分层协调控制框架

文献[61]中充分考虑到了长时间周期下负荷需求变化及分布式电源的发电波动,但相应研究以现有配电网辐射型网架为基础,环网状态下的协调控制技术则有待于进一步研究;另一方面,也未涉及到主动配电网孤岛状态下分布式电源协调控制策略的研究。因此,未来研究工作应在不同配电网网架结构及运行状态下实现分布式电源的协调控制。

先进电力电子技术促进了新型控制器件的产生及传统器件的升级,为有效实现对AND中分布式电源的控制提供了支撑,但也同时存在制造成本过高,运行不经济的状况,后续研究应加大在不提高投资水平下,实现控制技术的快速提升。

结束语

随着微电网、主动配电网等智能电网形式的发展,分布式电源的接入越来越多;电动汽车等柔性负荷的加入,也大大促进了分布式电源在解决用户侧能源瞬时需求的需要;储能装置的发展解决了分布式电源的能源存储问题;信息技术革命,能源互联网的兴起等多种有利因素共同促进分布式电源的发展与应用。通过对分布式电源接入系统相关研究及思考,指出可从以下几个方面进行深入:

1) 探讨如何在多种约束条件(多个目标函数)下计算出最为适宜的分布式电源准入容量(优化容量)及接入位置,同时深入研究高准确性、快速寻优的智能求解方法。

2) 在微电网控制方式选取过程中, 应综合考虑系统结构、负荷特性及控制目标等。如何解决微网协调控制问题将是下一步研究重点, 如探讨微分博弈技术在实现多代理协调控制中的应用。

3) 主动配电网的产生使得配电网控制及管理更加具有主动性, 但相关研究还有待于进一步深入, 如电动汽车与储能运行模式、需求侧主动性管理和智能化通信等方面对分布式电源接入的影响。

4) 通过政府激励, 扩大“互联网+”在智能电网中的应用, 研发更为先进的控制技术及通信技术, 实现分布式电源及储能的即插即用。

参考文献

- [1] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed generation: a definition [J]. Electric Power System Research, 2001, 57 (6): 195-204.
- [2] Lasseter R, Akhil A, Marnay C, et al. White paper on integration of distributed energy resources-the CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2003-10]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [3] D Adamo C, Jupe S, Abbey C. Global survey on planning and operation of active distribution networks: update of CIGRE C6.11 working group activities [C]. CIRED2009 (20th International Conference on Electricity Distribution), Prague, CZ: IET Services Ltd, 2009: 1-4.
- [4] Samuelsson O, Repo S, Jessler R, et al. Active distribution network-demonstration projection ADINE [C]. Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 11-13, 2010, Gothenburg, Sweden: 8.
- [5] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2009, 33 (3): 84-88.
- [6] 何昌齐, 邵龙, 高扬, 等. 分布式电源并网后对电压分布影响的研究 [J]. 中国电力, 2014, 47 (5): 88-91.
- [7] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30 (19): 27-30.
- [8] 谢秉鑫, 王宗, 范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (2): 116-119.
- [9] Doyle M T. Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 5 (1): 103-105.
- [10] 周末, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 1-10.
- [11] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (22): 156-165.
- [12] 钱科军, 袁越, Zhou Chen-ke. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究 [J]. 电网技术, 2008, 32 (11): 74-78.
- [13] 刘传铨, 张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (22): 46-49.
- [14] Wang Guoquan, Liu Zongqi, Liu Nian, et al. Reliability evaluation of distribution system with distribution generation based on islanding algorithm [C]. Proceedings of 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies. April 6-9, 2008, Nanjing, China: 2697-2700.
- [15] 李勇, 刘俊勇, 魏震波, 等. 计及天气的分布式电源对配电网可靠性的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (2): 93-98.
- [16] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析 [J]. 2010, 34 (4): 38-43.
- [17] Ackermann T, Knyazkn V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, Yokohama, Japan, 2002: 1357-1363.
- [18] Chiradeja P. Benefit of distributed generation:

- A line loss reduction analysis [C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Asia and Pacific Dalian, China, 2005: 1-5.
- [19] 张勇军, 翟伟芳, 林建熙. 分布式发电并网的网损影响评价指标研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (13): 134-137.
- [20] Walid El-Khattarm, Kankar Bhattacharya. Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19 (2): 1674-1684.
- [21] 王敏, 丁明. 含分布式电源的配电系统规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (6): 5-8.
- [22] Agustoni A, Brenna M, Faranda R, et al. Constraints for the interconnection of distributed generation in radial distribution systems [C]. Proceedings of IEEE 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, Brazil, Piscataway, NJ, USA, 2002: 310-315.
- [23] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的注入容量与优化布置的实用方法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (10): 109-114.
- [24] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (19): 13-17.
- [25] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (10): 87-92.
- [26] 雷金勇, 黄伟, 夏翔, 等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 82-85.
- [27] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (22): 37-43.
- [28] 陶顺, 郭静, 肖湘宁. 基于电流保护原理的DG准入容量与并网位置分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (1): 265-270.
- [29] 江南, 龚建荣, 甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (3): 19-23.
- [30] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接线方式 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (24): 108-113.
- [31] 夏翔, 黄伟, 徐祥海, 等. 考虑小水电启停策略的准入容量计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (22): 48-52.
- [32] 王超, 胡骅, 何阳, 等. 考虑分接头振荡约束的分散电源准入容量计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (3): 36-41.
- [33] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2): 36-48.
- [34] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划 [J]. 电网技术, 2013, 37 (4): 914-921.
- [35] 庄园, 王磊. 分布式电源在配电网中优化选址与定容的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (20): 73-78.
- [36] 夏澎, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 115-121.
- [37] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (3): 58-63.
- [38] Willis H L. Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction [C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, USA, 2000: 1643-1644.
- [39] Griffin T, Tomsovic K, Secrest D, et al. Placement of dispersed generation systems for reduced losses [C]. Proceeding of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Pine Bluff, AK, USA, 2000: 1446-1454.
- [40] 顾承红, 艾芊. 配电网中分布式电源最优布置 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (11): 1896-1900.
- [41] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容 [J]. 电力系统自动化,

- 2006, 30 (3) : 38-43.
- [42] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (4) : 23-28.
- [43] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用 [J]. 电工技术学报, 2008, 23 (2) : 203-107.
- [44] 汪兴旺, 邱晓燕. 基于改进粒子群算法的配电网分布式电源规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (14) : 16-20.
- [45] Sulaiman M H, Mustafa M W, Azmi A, et al. Optimal allocation and sizing of distributed generation in distribution system via firefly algorithm [C]. IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, Melaka, Malaysia, 2012: 84-89.
- [46] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的分布式电源规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26 (5) : 39-43.
- [47] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (25) : 17-25.
- [48] 杨文荣, 吴海燕, 李练兵, 等. 配电网中基于人工鱼群算法的分布式发电规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (21) : 156-161.
- [49] Lopes J A P, Moreira C L, Madureira A G, et al. Control strategies for microgrids emergency operation [C]. International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005: 1-6.
- [50] 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.
- [51] 郜登科, 姜建国, 张宇华. 使用电压-相角下垂控制的微电网控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (5) : 29-34.
- [52] Paigi P, Lasseter R H. Autonomous control of microgrids [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [53] Guerrero J M, Matas J, de Vicuna L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, 54 (2) : 994-1004.
- [54] Kim J, Guerrero J M. Mode adaptive droop control with virtual output impedance for an inverter-based flexible ac microgrid [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, 26 (3) : 689-701.
- [55] Dimeas A L, Hatziahyriou N D. Operation of a multiagent system for microgrid control [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20 (3) : 1447-1455.
- [56] Chatzivasiliadis S J, Hatziahyriou N D, Dimeas A L. Development of an agent based intelligent control system for microgrids [C]. IEEE PES General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, USA, 2008: 1-6.
- [57] Jain P, Ranade S J, Srivastava S K. Island identification in customer-driven microgrids [C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010: 1-7.
- [58] Cai N, Mitra J. A decentralized control architecture for a microgrid with power electronic interfaces [C]. North American Power Symposium (NAPS), 2010: 1-8.
- [59] Zhao J, Wang C, Zhao B, et al. A review of activemanagement for distribution networks: current status and future development trends [J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42 (3/4) : 280-293.
- [60] 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.
- [61] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 多时间尺度下基于主动配电网的分布式电源协调控制 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (9) : 192-203.

(收稿日期: 2015-01-18) **EA**