

高成本效益的分布式可再生能源并网方法

Till Luhmann^{1*}, Enno Wieben², Riccardo Treydel², Michael Stadler¹, Thomas Kumm²

摘要: 本文介绍了一种配电网容量管理的具体方法。经模拟发现, 通过将每台发电机的全年发电量削减最多 5 %, 可使配电网的并网容量翻倍。本文同时还介绍了为验证此方法而在德国北部的农村配电网进行的现场测试的设置和初步结果。

关键词: 电网容量管理, 5 % 法, 可再生能源, 电力分配网

1 引言

为应对全球气候变化的挑战, 德国联邦政府发布了未来利用混合能源发电的目标。到2050年, 德国可再生能源(RES)的发电量应占到总发电量的80 %。其他国家也为RES的建设制定了长远目标。因此, 这些国家的配电网的利用将越来越多地取决于分布式RES的馈入。但是, 传统的电网结构在设计上尚无法应对具有非连续馈入特性的分布式能源的大规模接入, 如风力发电厂和太阳能发电厂。

德国当前的电网系统设计是按照最坏的情况进行的: 电网的设计尺寸可支持最大负载。因此, 由于风能发电厂和太阳能发电厂的间歇性馈入, 电网容量利用率达到100 %的情况在一年内仅出现几个小时, 即偶尔会发生在有阳光或暴风雨的周末, 当低功耗与风能和太阳能的随机高产同时出现时。

依据德国当前法令[1], 配电网须投入运转以吸收RES产生的电能。在现有的电网基础设施和操作程序的限定范围内, 这种操作会导致配电网超出电力系统设备(如变压器负荷和电缆负荷)的操作限定范围或违反电压阈

值的情况发生。但是, 如果没有其他选择来防止电网基础设施受到危害, 电网运营商只能把通过馈入管理来削减RES作为最后的手段。一旦采取这种措施, 电网运营商将立即被法律强制扩建受削减影响地区的电网基础设施(见参考文献[1]第12节)。在德国进行“能源转型”(向RES转化)的早期, 这是一项推动全国快速累积RES发电容量的恰当措施。然而如上所述, 现在越来越多的配电网结构的利用率并不尽如人意。

到2025年, 德国安装的RES风能和光伏(PV)发电容量预计会比2013年提高187 %; 到2035年, 该发电容量预计会比2013年提高236 %。这些数据来源于德国2025年电网发展计划下的主要扩展方案[2]。基于上述制度背景, 只要未来采用传统的电网扩张措施, 就需要大量的电网建设投资来支持RES并网。这就需要细化有效功率削减的方法(如本文提出的5 %法)开展调查。

EWE NETZ是德国西北部的一家配电系统运营商(DSO), 其经营的区域电网配有180个高压/中压变压器和18 000个高压/低压变压器, 电网线路全长为81 000 km, 接入客户约为800 000个, 最大消耗负荷为2.2 GW。电网中已接入了2900台风力发电机(装机发电容量峰值为4.6 GW)、57 000台光伏发电机(装机发电容量峰值为1.5 GW)和1500台生物质发电机(装机发电容量峰值为0.6 GW)。这些数字在未来还会继续增长。对于EWE NETZ运营的电网, 到2020年, 平均RES发电量预计会达到年用电量的150 %。EWE NETZ会一直进行电网扩建, 因此该公司会不断地寻找一些低成本且能提高RES网络连接容量的解决方案。

¹ BTC Business Technology Consulting AG, Oldenburg 26121, Germany; ² EWE NETZ GmbH, Oldenburg 26133, Germany

* Correspondence author. E-mail: till.luhmann@btc-ag.com

Received 2 September 2015; received in revised form 24 November 2015; accepted 1 December 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(4): 447–452

引用本文: Till Luhmann, Enno Wieben, Riccardo Treydel, Michael Stadler, Thomas Kumm. An Approach for Cost-Efficient Grid Integration of Distributed Renewable Energy Sources. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015099

本文首先总结了在较低的成本下最大化RES并网容量的技术可能性；然后进一步详细地介绍了动态电网容量管理的方法，即“5%法”。

2 提高并网容量的方法概述

提高并网容量的传统方法包括铺设新电线、增加横截面更大的导线数量和安装容量更高的变压器。然而现在也有一系列其他技术可用来提高并网容量：其中一些基于灵活的电力系统设备，另一些则基于信息技术的使用。

对于中压电网来说，提高并网容量的新方法均以上述两种观点为基础：通过稳定电压或控制功率馈入来优化负载流量。低冲击运行模式(LOM)就是一个稳定电压方法的例子[3]。它通过给发电机分配恒定的功率因数使电网连接点沿功率梯度方向的电压灵敏度最低。该方法依靠配有移相控制器的发电机使电压稳定性得到提高。第二种稳定电压的方法是使用纵向电压控制器，主要是在不影响相位的情况下，通过改变控制阻抗来修改电压。第三种方法是采用静止同步补偿器(STATCOM)，主要通过向电力系统注入或从该系统吸收大量的无功功率来调节电压。

在以分布式RES为主导的电网中，当RES的高产和低功耗同时发生时，电网负载会达到最大值。因此，控制负载流量的方法必须基于控制用户或对RES发电机进行切机。在德国，目前正在对静态切机和动态切机这两种限制方法进行讨论。静态切机对已安装在配电网某一指定段的发电机的馈入进行限制，将其限制在发电机功率固定百分比的范围内。该百分比通过模拟计算得出，以此避免电网组件出现过载的情况。因为该方法不需要额外的信息和通信技术组件，所以从技术角度而言比较简单。但是，静态切机的缺点是对能量的削减往往超过所需要的量，甚至在发电机的馈电并不会导致电网过载时仍进行发电机切机。相比之下，动态切机则更为有效：仅在发电机会导致电网拥塞的情况下才进行发电机切机。

图1是典型的光伏发电机年馈入量的历时曲线图。从图中可知，光伏发电机的馈入量接近该光伏发电厂最大发电量(300 kW)的情况每年仅出现几小时，而且每年这几小时的馈入量削减并不会造成可用能源的大幅度减少。按照这种方法，近期由德国联邦经济和能源部进行的一项研究[4]显示，通过将风力和太阳能发电机的年馈入量削减3%，可把为适应RES接入进行的电网扩建成本降低40%；当风力和太阳能发电机年馈入量的削减达5%时，就能使上述成本降低50%。本文将以5%的削减率为基础，重点对该方法的技术实施进行描述。

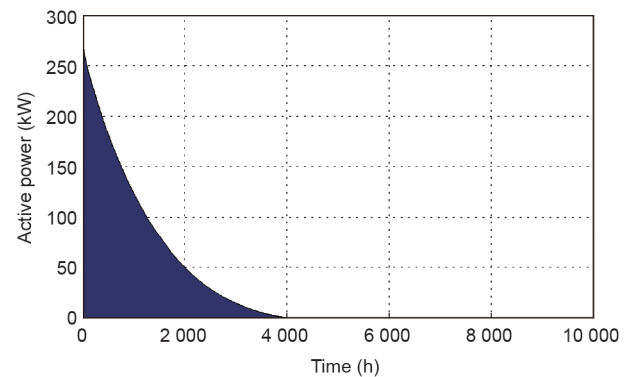


图1. 光伏发电机年馈入量的历时曲线图。

将拥塞管理用于输电网是另一种优化电网的方法。但是，与文中描述的通过技术控制电网使用的方法不同，该方法基于市场机制，通过对负载和馈入量的预测进行跨境电网输电量的拍卖。由于预测存在误差，拥塞管理必须辅以市场作为辅助服务。在德国，并未建立针对DSO的市场参与体系，因此目前没有以市场为基础的方法可用于优化配电网的使用。但是，这是一个值得讨论和研究的话题[5]。

3 5%法

5%法基于以下假设：当仅在少数最大负荷情况下根据载流对RES发电机的年馈入电量进行动态的、较小百分比的切机时，并网容量会相应增加。对于每台发电机，该方法将最大削减量限制为发电机年产能的5%。通过对时间和功率两方面采取精细化控制，将切机的频率和持续时间减少到必要的最低值。

3.1 通过模拟评估5%法

采用由EWE NETZ运营的与农村电网类型相对应的模型进行模拟计算。模型的特点如下：

- 该模型包括一个110 kV转20 kV的变压器，以连接高压电网和中压电网；还包括集群低压电网。
- 假设在电网内对分布式RES(风能、光伏和生物质能)进行典型调配。
- 基于以年度时间序列(分辨率为15 min)提供的电流和电压计算稳态功率流。
- 测量RES馈入(光伏、风能)的时间序列被用于对产生的负载进行建模。
- 家用消耗负载的测量以RWTH Aachen [6]设计的负载模型为基础进行，且测量得到的负荷被用于工业用电设备。

以中压电网模型为基础，对不同的模拟方案进行评估，同时采用尽可能多的RES馈入进行参考设置，使其略低于“阈值”。“阈值”是并网容量接近极限、有必要进行切机时的值(笔者称之为“100%方案”)。为确定建模电网的“阈值”，将所有RES发电机容量进行迭代增加。从低发电能力开始，逐步添加越来越多的发电机直到达到切机标准(例如，直到实现变压器或电缆的最低允许稳定电压或最大允许负载)。以“100%方案”为起点，在进行对比计算时逐步增加发电容量，从而模拟越来越高的RES馈入量。根据模拟设置，在对比计算中将需要越来越多的削减。不管系统参数何时超过允许范围，馈入量都将按照基于负载流量的优化算法的计算量进行削减。

图2显示了作为削减函数的RES的并网容量。原点代表“100%方案”。由图中可看出，削减越多，RES发电能力与电网的联系越紧密。因此，两条曲线代表了两个不同方案：在一个方案(蓝线)里，假设风力发电厂的年发电量相对较低，且其风力发电机的全负荷小时数为1500 h；而在另一个方案(红线)里，假设风力发电厂的年发电量相对较高，且其风力发电机的全负荷小时数为2000 h。从图中可明显看出，与弱风年相比，强风年会更频繁地达到电网限制(负荷、电压)。因此，强风年需要削减更多的发电量。当削减率为5%时，模拟数据显示，两种风型年的并网容量均超过200%。

3.2 现场测试验证5%法

为了在现场条件下对5%法进行评估，2014年10月实验组现场测试了实践中有功馈入的减少与并网容量的提高之间的关系。下一步需要进行评估的实际问题是电网需要

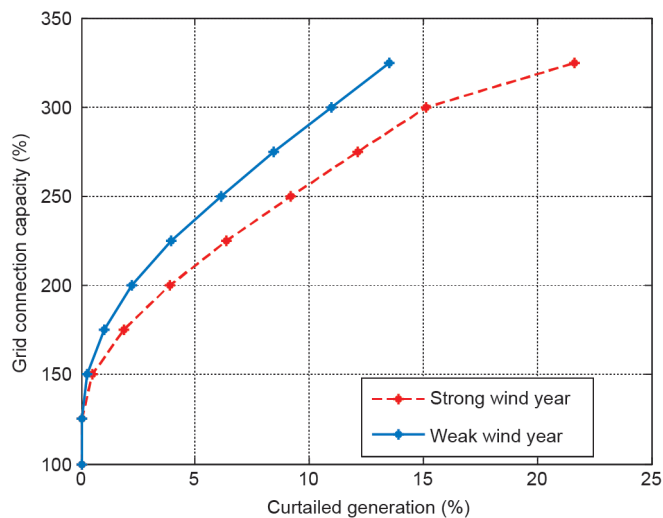


图2. 削减的发电量和并网容量之间的相关性(模拟)。

在多大程度上使用现有的现场控制单元去实施5%法。

图3介绍了所选的现场测试的区域。在该区域选择了在馈入特性、RES发电机类型和产能-消耗比方面具有典型特征的20 kV中压电网作为测试对象。因低压电网下的屋顶光伏发电对电网总功率馈入不产生重大影响，所以不受简化原因控制。在该区域中，所有与中压电网相关的RES发电厂都配备有合适的控制单元。

在现场测试中，中压电网电连接到Jever变电站，该变电站同时又与高压电网相连接。为了避免与其他不属于本次现场测试的电网相互干扰，在现场测试期间开关站Tettens和Wittmund的开关处于开启状态。

现场测试区域包括11台分布式发电机，且对应的各台发电机的最大馈入量为10 MW。其中包括6台风力发电机、4台光伏发电机和1个综合热电厂。在现场测试期间，11台发电机的有功功率受主动控制。由于现实原因(避免发电厂运营商以额外控制活动干扰现场测试)，发电机以恒定无功功率比运转。所有与现场测试的中压电网相关的RES发电厂都配备有合适的控制单元。

在测试区域设计了专门的控制代理，即5%控制器，该控制器用来执行发电机的调节馈入任务(图4)。测试过程中每5秒给5%控制器提供一次以下数据，这些数据需要通过连续测量获得：

- 中压电网与Jever变电站连接点的电流(I)；
- 全部11台RES发电机的变电站、开关站和电网连接点的电压(U)；
- 全部中压/低压变电站的功率和初级电压(P 、 Q)；
- 全部11台RES发电机的无功功率、有功功率和电压(U 、 P 、 Q)；
- 风力和辐射测量(为了验证的目的)。

5%控制器不断比较测量值和设定值(U 、 I)。当发现偏差时，控制值(调整后的有功功率值， P)则被传送到发电机。

一般来说，评估并网容量相关的数量是在EN 50160 [7]所容许的电压范围和电网设备允许的电流范围内的。但对于现场测试来说，不可能缩小现有物理电网的容量。相反，根据EN 50160，操作阈值(电网电压阈值和设备最大允许电流)在理论上要削减到物理阈值的50%。5%控制器是在减少的电网阈值下运行的。

需要注意的是，5%控制器是自主运行的，没有对RES发电机的切机进行限制。测试范围是评估在统计上充裕的时间段内对整体的削减是否与图2所示的模拟结果一致。为了收集足够的统计证据，现场测试将进行至少一年，同时对每台发电机削减量和整体削减量进行定期评估。

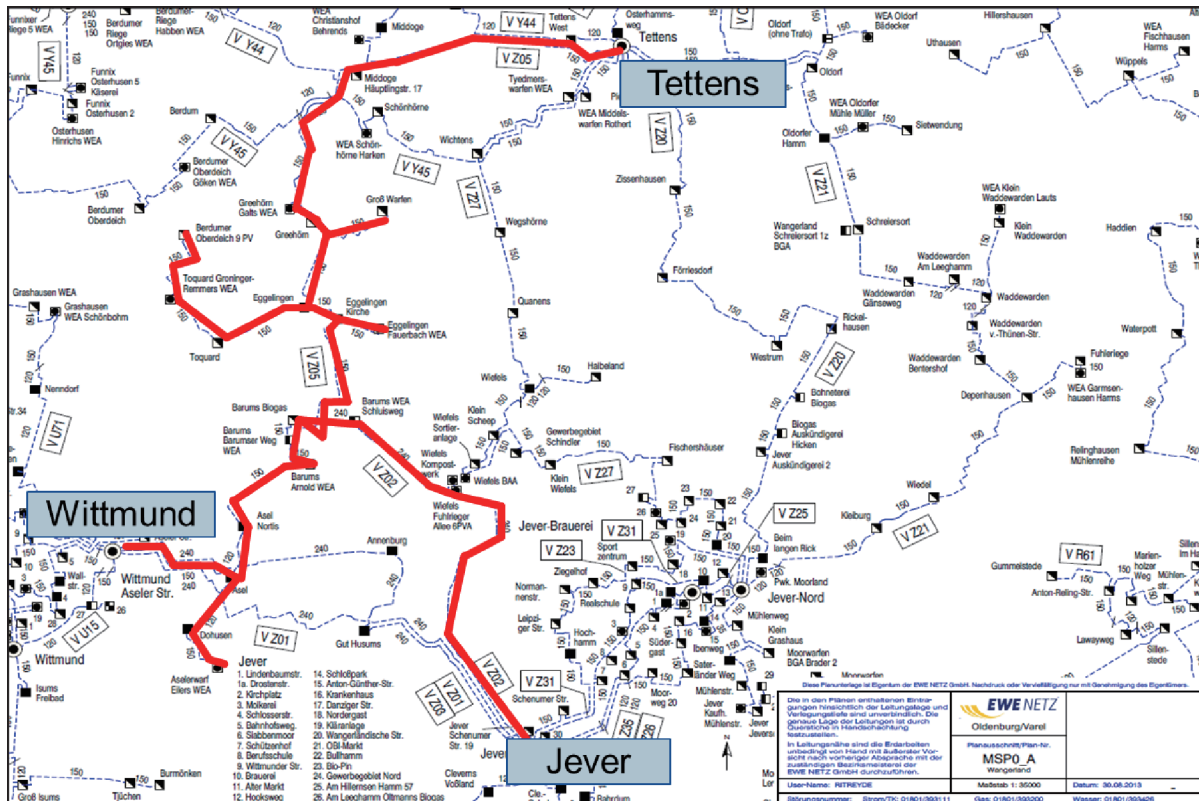


图 3. 位于德国北部进行现场测试的区域。

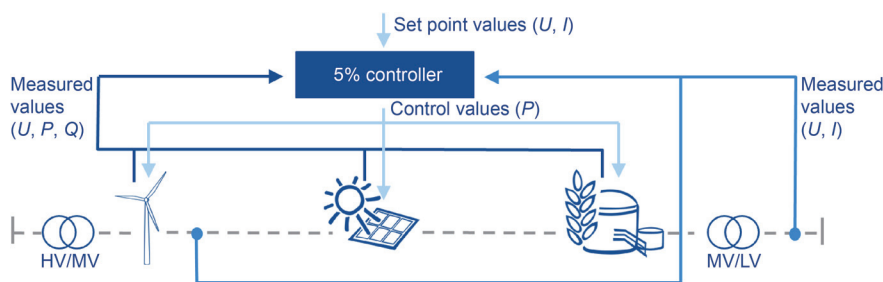


图 4. 现场测试中 5% 控制器的系统配置。

3.3 将 5% 法应用到典型的配电网中

为了评估 5% 法对该典型配电网的适用性, RWTH Aachen 开展了一个系统研究[8]。通过评估发现:

- 对于德国 70% 的农村配电网来说, 可通过削减每台发电机馈入的 5% 来使并网容量翻倍。
- 在德国, 当把能源的削减量限制在可能馈入量的 5% 时采用静态切机, 此时仅 12% 的配电网的并网容量可翻倍。
- 大多数光伏发电的电网部分需要的切机率高于混合 RES 发电的电网部分。

4 第一次现场试验的结果

图 5 显示了过载情况下风力发电机的削减情况。对特定的风力发电机来说, 控制单元发布的控制值(红色曲线)会使该发电机的馈入降低(蓝色曲线)。

该图以该风力发电机的无限制的可能馈入作为参考(绿色曲线)。绿色曲线和蓝色曲线之间的阴影区域就是能源的削减量。

到目前为止, 现场测试已经表明风力发电机的控制行为是良好的, 尤其是在高发电量的情况下。在低发电量的情况下, 旧型的风力发电机会自动关闭, 这样就不可能对该风力发电机的发电量进行灵敏的控制。目前, 这种操作方法还未使电网出现过危险情况。光伏发电表现出的控制行为与风力发电机相似, 但是需要额外的电子控制单元来延迟它们的反应时间。而热电联产发电机的反应时间是有限的, 这主要取决于它们内燃机的特性。

考虑到电网可能发生的危险情况, 需要对测量到的变压器的每分钟电流平均值进行监控。从监控结果可以看出, 尽管时间很短, 但所测电流有时还是超过了规定的阈值。在 15 min 的平均值中完全识别不到超出阈

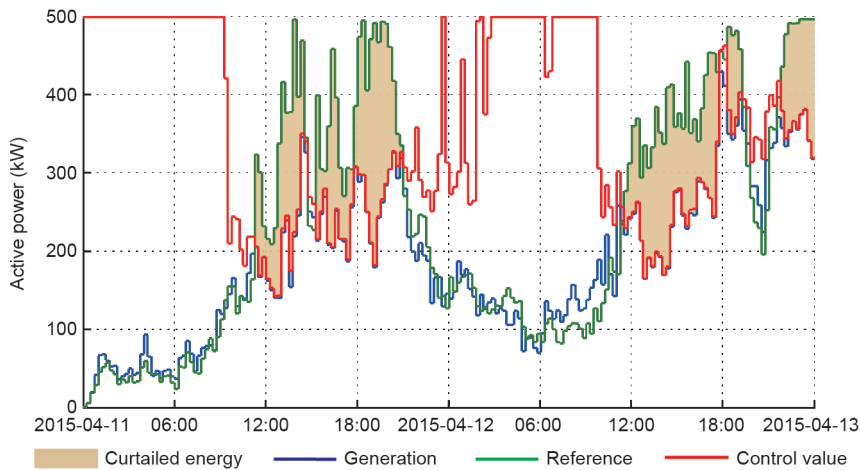


图 5. 在样本时间跨度内对风力发电机的削减情况。

值的情况。超出阈值的原因主要有以下几个方面：

- 发电机惯性；
- 天气多变；
- 由于GSM通信造成的时间延迟；
- 不同发电机间分配削减量算法的不成熟。

经过9个月的现场测试后，削减的馈入量已经达到参与测试的发电厂年预计馈入量的6%。造成该结果的部分原因是参与现场测试的热电联产发电厂未遵循5%控制器给出的控制信号。热电联产发电厂的首要目标是产生尽可能多的热量，但这与测试削减的目标相冲突。然而，该现场测试观察到的与5%控制器行为相关的发现(如2015年年初的疾风情况)，对进一步优化控制算法是有价值的提示。

5 结论与展望

对于RES并网的成本最小化来说，5%法是一种非常具有前景的模块构建方法。模拟结果显示，发电机的动态切机可大大提高并网容量。现场测试也说明技术实施是可能的，且所选择的方法也是可利用的。但是，目前的结果显示：

- 控制电网中的每台发电机必须是可控的。虽然当大多数分布式发电单元不可控时5%控制器仍将继续正常工作，但由于仅对可控发电机的年发电量削减5%而不能达到并网容量翻番的预期效果。
- 必须优化5%控制器以尽量降低每一台发电机的切机频率。

近期，一项与本研究同时开展的系统研究[8]也表明，通过切机增加的并网容量取决于发电机类型和配电网类型。

5%法在监管方面的问题不属于现场测试的一部分。但是，现场测试的结果可作为2016年德国能源行业法律修正案的补充内容。基于5%法，该修正案在将来很有可能将减少动态切机的需求。

Compliance with ethics guidelines

Till Luhmann, Enno Wieben, Riccardo Treydel, Michael Stadler, and Thomas

Kumm declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. National Parliament of the Federal Republic of Germany. Act on the development of renewable energy sources. 2014[2015-11-24]. <http://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/renewable-energy-sources-act-eeg-2014.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=en,rwb=true.pdf>
2. German Federal Agency for Electricity, Gas, Telecommunications, Post and Railway. 2014[2015-11-24]. http://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2025/SR/Szenariarahmen_2025_Genehmigung.pdf?blob=publicationFile
3. V. Diedrichs, A. Beekmann, M. Kruse. Reactive power capability and voltage control with wind turbines. In: T. Ackermann, ed. *Wind Power in Power Systems*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2012: 975–998
4. J. Büchner, et al. Forschungsprojekt Nr. 44/12: Moderne verteilternetze für deutschland (Verteiler-netzstudie). 2014[2015-11-24]. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/verteilternetzstudie.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
5. German Association for Energy and Water Industries. Diskussionspapier—Smart Grids Ampelkonzept. 2015[2015-11-24]. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150310-diskussionspapier-smart-grids-ampelkonzept-de/\\$file/150310%20Smart%20Grids%20Ampelkonzept_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150310-diskussionspapier-smart-grids-ampelkonzept-de/$file/150310%20Smart%20Grids%20Ampelkonzept_final.pdf)
6. S. Dierkes, A. Wagner, J. Eickmann, A. Moser. Wirk- und blindleistungsverhalten von verteilternetzen mit hoher durchdringung dezentraler erzeugung. In: *Internationaler ETG-Kongress 2013: Energieversorgung auf dem Weg nach 2050—Symposium 1: Security in Critical Infrastructures Today*. Berlin: VDE Verlag, 2013
7. European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50160:2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. London: British Standards Institution, 2010
8. S. Dierkes, M. Maercks. Systemstudie—5%-ansatz. In: A. Moser, ed. *IAEW Annual Report 2015, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Vol. 162*. Aachen: Print Production Verlag, 2015[2015-11-24] http://www.iaew.rwth-aachen.de/fileadmin/uploads/pdf/neuigkeiten/FGE-Jahresberi-cht_2015.pdf