含光伏发电系统配电网电能质量的措施研究

文/李东明
大庆油田有限责任公司天然气分公司

受到光伏出力波动性的影响，在对配电网电能质量进行治理时通常会因忽略谐波抑制而导致治理效果不佳。对此，提出含光伏发电系统配电网电能质量的措施研究。对光伏发电特性进行分析，选取节点电压偏差以及电流总谐波率这两个指标作为电能质量治理指标，对电压稳定性以及电流波形质量进行表征。以治理指标最小化作为优化目标，并结合功率平衡条件对约束条件进行设计。引入非线性收敛因子对灰狼算法的搜索过程进行优化，并通过更新灰狼位置的方式求解出最优配置方案。分别从低电压治理、三相不平衡治理以及谐波治理三个方面提出具体的治理措施，从而搭建出电能质量治理框架。在实验中，对提出的方法进行治理效果的检验。最终的测试结果表明，采用提出的方法对配电网电能质量进行治理后，配电系统波形畸变率较低，具备较为理想的治理效果。

近年来，随着二次能源的开发利用，大庆油田地面光伏电站建设渐渐成为创建百年油田洪流中的新亮点。大庆油田有限责任公司储运系统计量间、阀室间等一些站场由于地处偏远，无法建立集中的低压供电系统。在这种情况下，光伏发电供电系统大有用武之地。

传统的配电网设计主要基于稳定的电源供应和负荷需求，而光伏发电系统的接入打破了这一平衡。光伏发电的输出功率受光照强度、温度和阴影遮挡等多种因素影响，其输出具有间歇性和不确定性[1]。当大量光伏发电系统同时接入配电网时，电网的功率平衡将受到严重影响，可能导致电压波动、谐波污染和频率偏移等电能质量问题。这些问题不仅影响用户的用电体验，还可能对电力系统的安全运行造成威胁。

对此，本文通过对配电网电能质量治理指标进行选取，并结合灰狼优化算法搜索得到最优配置方案，在此基础上搭建出治理框架，从而有效提高电能质量。

背景分析

大庆油田天然气分公司各储运大队管网包含很多偏远地区的阀组间和站点，近年来随着无人值守站场及储运系统管输数字化、智能化建设的发展，迫切需要为厂区监控、报警、无线通信联网、阀门电动执行机构和管网电伴热保温等提供低压供电电源。光伏系统建设成本低、不受当地电网匮乏的限制。因此，在本公司偏远站场的低压供电问题中，光伏发电系统作为一种清洁、可再生的能源解决方案，逐渐受到关注。然而，光伏发电系统的实施并非一帆风顺，尤其是在面对计量间、阀室等防爆场合的特殊需求时，其设计与应用面临诸多挑战。

地面光伏系统具有显著的优势，能够利用广阔的地面空间，安装大规模的光伏板阵列，从而实现较高的发电效率。此外，地面光伏系统便于维护和监控，有利于长期稳定运行。对于本公司偏远的计量间、阀室等用电负荷较小的场合，光伏供电系统能够提供可靠的电力支持，减少对传统电网的依

赖，降低运营成本。

然而，地面光伏系统也存在一些弊端。例如，土地资源的占用、环境影响以及初期投资成本较高等问题。特别是在防爆场合，光伏设备的设计和选型更加复杂。由于防爆要求严格，市场上符合标准的成型产品较少，给光伏系统的实施带来了额外的难度。

尽管如此，考虑到偏远站场的实际情况，光伏供电系统仍然具有较高的适用性。虽然光伏发电系统在实施过程中面临诸多挑战，但通过合理的设计和优化，可以充分发挥其在偏远站场低压供电中的优势，为公司的可持续发展提供有力支持。

为此，本研究针对含光伏发电系统配电网电能质量的措施展开研究，以期能够优化光伏发电系统的质量。

含光伏发电系统配电网电能质量的措施研究

1. 配电网电能质量治理指标选取

由于配电网电能质量容易受到电源质量以及负载特性等多方面因素的影响，因此为治理电能质量，提出具体的治理措施。首先综合考虑光伏出力的波动性以及不确定性对治理指标进行选取。

指标1：节点电压偏差

对于光伏发电系统接入的配电网而言，由于光伏发电通常缺乏无功输出能力，因此节点电压偏差问题尤为突出[2]。对此，选取节点电压偏差作为电能质量治理指标。该指标可以反映出电压的稳定性以及供电质量，计算公式为

$$\Delta V_i = V_i - V_i^{\mathrm{ref}} \tag{1}$$

式中，ΔV_i为第i个节点的电压偏差值；V_i为第i个节点的实际电压值；V_i^{ref}代表第i个节点的电压限制幅值。

指标2：电流总谐波畸变率

谐波问题影响到电力系统的稳定运行和电气设备的正常工作。对于光伏发电系统而言，逆变器在进行电流转化时容易产生高次谐波，导致谐波污染。因此，选取电流总谐波畸变率对配电网电流波形的畸变程度进行表征，计算公式为

$$\mathrm{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中，THD为电流总谐波畸变率；I_h为第h次谐波分量的有效值；I_1为电流基波分量实际值。

通过对光伏发电特性进行分析，选取节点电压偏差以及电流总谐波率这两个指标，对电压稳定性以及电流波形质量进行表征。

2. 配电网配置优化方案求解

结合选取的电能质量治理指标，将通过优化配电网的结构、控制策略和参数设置，使各个节点的电压尽可能地接近其额定电压，并降低电力谐波含量，从而提高电能质量[3]。对此，设计的配电网配置优化目标表达式为

$$F = \sum_{i=1}^{N} w_1 \Delta V_i + \sum_{J=1}^{M} w_2 \mathrm{THD}_J \tag{3}$$

式中，THD_J为第J个谐波源的总谐波畸变率；N和M分别为配电网节点总数以及谐波源总数，w_1和w_2分别为权重系数，用于平衡两个指标的重要性[4]。

针对上述构建的目标函数，结合功率平衡条件，对约束条件进行设计，表达式为

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} + P_i^{\mathrm{PV}} - P_i^{\mathrm{Load}} = 0 \tag{4}$$

式中，P_{ij}为从节点i流向节点j的有功功率；P_i^{PV}为节点i处光伏系统产生的有功输出；P_i^{Load}为节点i处的有功负荷；Ω_i为与节点i直接相连的节点集合。

针对构建出的目标函数，引入非线性收敛因子对灰狼算法进行改进，并采用优化后的算法搜索出最优配置参数组合。非线性收敛因子a的计算公式为

$$a = 2 - \left(\frac{2 \times \mathrm{iter}_{\mathrm{cur}}}{\mathrm{iter}_{\max}} \right)^n \tag{5}$$

式中，$\mathrm{iter}_{\mathrm{cur}}$和$\mathrm{iter}_{\max}$分别为当前迭代次数以及最大迭代次数；$n$为收敛控制参数。

配电网配置优化函数求解流程如图1所示。

通过上述步骤即可完成对于配电网配置方案的有效求解。以节点电压偏差以及电流谐波畸变率最小化作为优化目标，并结合功率平衡条件对约束条件进行设计。引入非线性收敛因子对灰狼算法的搜索过程进行优化，并通过更新灰狼位置的方式求解出最优配置方案。

3. 电能质量治理框架搭建

针对上述求解得到的配电网配置方案，分别从低电压治理、三相不平衡治理以及谐波治理三个领

域进行详细分析，并搭建出电能质量治理框架如图2所示。

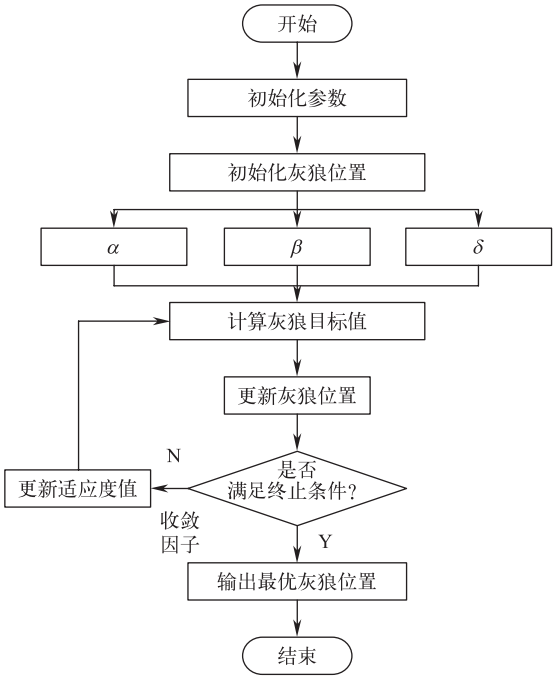

图1　配电网配置优化函数求解流程

图2　电能质量治理框架

对于电压偏差较大的情况，选择通过增加输电线路、变电站设备容量等方式，对电力系统的供电能力进行扩容处理。增加供电回路，优化供电线路布局，从而提高网络结构的适应性[5]。同时将单相负荷均匀地分配到三相上，通过重新分配单相负荷、使用断路器或开关重新安排电路等方式，确保每相的电流值接近相等。在谐波治理方面，使用谐波滤波器、有源滤波器等谐波抑制装置，将谐波电流补偿掉，并采用高阻抗的配电变压器，减少谐波的传播。

将本节内容与上述提到的治理指标选取以及配电网配置方案求解等相关内容进行结合，至此，含光伏发电系统配电网电能质量治理方法设计完成。

实验论证

为证明本文提出的含光伏发电系统配电网电能质量治理方法在实际治理效果方面优于常规的配电网电能质量治理方法，完成措施方面的设计后，通过搭建实验对比环节，对提出方法的实际应用效果进行检验。

1. 实验说明

为验证本文提出的含光伏发电系统配电网电能质量治理方法在实际治理效果方面的优越性，本次实验选取两组常规的配电网电能质量治理方法作为对比对象，分别为基于扰动抑制的配电网电能质量治理方法，以及基于交互机理的配电网电能质量治理方法。通过搭建实验对比环节，采用三种方法对同一个配电网模型进行电能质量治理，对比不同方法的实际治理效果。

2. 实验对象

本次实验所选取的含光伏发电系统配电网采用辐射状与环状相结合的混合结构。核心区域采用双环网结构，确保供电的可靠性和灵活性。在配电网的末梢及新能源接入点，则采用辐射状结构，以适应光伏发电系统及其他分布式电源的接入。该配电网覆盖面积约为100 km^2，包含2个变电站作为电源点，共计10条主干线路，总长度达到150 km。其中，高压线路（10 kV）占70%，低压线路（0.4 kV）占30%。光伏发电系统分布于配电网中的5个主要节点，总装机容量达到5 MWp。实验采用MATLAB仿真软件对该配电网进行仿真建模，通过对该电网的参数进行调取，从而搭建出的仿真配电系统结构如图3所示。

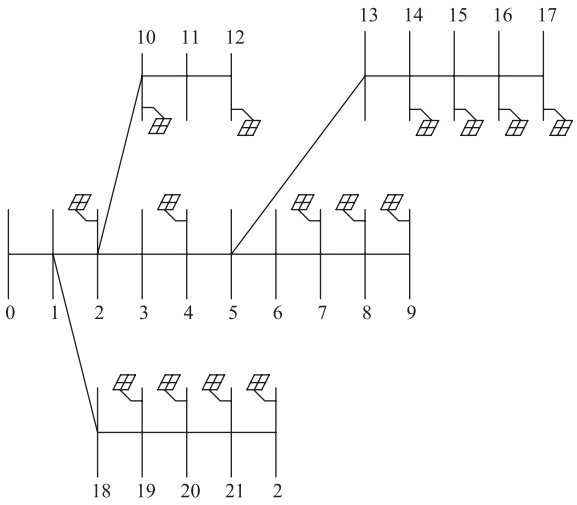

图3　仿真配电系统结构

针对上述构建出的仿真配电系统，分别采用三种方法对其进行配置优化，从而提升该电网的电能质量。待实验完成后，对不同治理方法下的电网运行情况进行记录，从而实现实验对比。

3. 治理效果对比

本次实验以不同治理方法下的仿真配电系统波形畸变率作为对比指标，对方法的实际治理效果进行衡量，具体实验对比结果见表1。

表1　不同治理方法下的配电系统波形畸变率对比结果

（%）

实验组数	本文方法	常规方法A	常规方法B
01	1.12	2.18	2.56
02	1.15	2.25	3.02
03	1.14	2.254	2.16
04	1.02	2.13	3.15
05	1.08	2.28	3.54

通过上述实验结果可以看出，在针对相同的仿真配电系统进行电能质量治理时，不同方法所提出的治理措施的实际效果也有所不同。通过对比波形畸变率可以看出，本文治理方法下，电网中谐波含量明显更低，证明本文提出的方法具备更为优秀的治理效果。

结束语

本研究的意义不仅在于提高光伏发电系统的并网效率和稳定性，更在于优化整个配电网的运行性能，保障用户用电的稳定性。通过对电能质量指标进行分析，能够更加精准地把握光伏发电系统对电网的影响，进而制定针对性的措施。EA

（收稿日期：2024-09-18）

参考文献

[1] 谢铖，陶佳融，张鹏飞．含分布式电源的配电网电能质量扰动检测研究[J]．电气技术与经济，2024(3)：67-69．

[2] 倪少军，于铄航，华程，等．基于PIMC-STATCOM的低压配电网电能质量治理[J]．供用电，2023，40 (11)：76-83．

[3] 徐军岳，柳毅，桂家娥．基于不平衡补偿的低压配电网电能质量问题及治理对策研究 [J]．电气传动，2024，54 (1)：33-39．

[4] 黄大岸，龚青，赵亮亮．分布式储能对低压配电网电能质量的影响[J]．红水河，2023，42 (6)：56-62．

[5] 李福旺，付宝鑫，高帅．智能化技术在配电网电能质量治理中的应用[J]．集成电路应用，2023，40 (11)：198-199．