

基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真研究

王佰淮¹, 邬桐^{2,3}, 张卫正¹, 方学珍¹, 李盈枝¹

(1. 国网天津市电力公司培训中心, 天津 300181; 2. 东北大学 电气与电子工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为了增强电网运行稳定性, 并提高电网供电能力, 提出基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真方法。通过 DIgSILENT/PowerFactory 软件计算电网设备中谐波数据, 包括: 发电机、变压器、负荷、输电线路、并联电容器组等各部分谐波; 根据获取的谐波数据, 将 APF 为核心的有源电力滤波器与静止无功发生器(SVC)相结合, 使晶闸管投切电容器(TSC)以及 H 桥型连接的 APF 与电网互联, 设置电感参数, 实现电流的跟踪; 根据开环控制, 使 TSC 和 APF 在稳定情况下并行工作, TSC 自主式分级对不断变化的无功实行补偿, 利用 APF 再次补偿各级之间无法完成的部分, 完成电网谐波无功补偿综合抑制。仿真结果表明: 所提方法可有效抑制谐波, 且各谐波电流含量均在国标值范围内, 有效增强了电网供电性能。

关键词: 谐波无功补偿; 电网供电能力; 有源电力滤波器; 静止无功发生器; DIgSILENT/PowerFactory 软件; 谐波数据

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd22056

Simulation Research on Power Supply Capability of Power Grid Based on Harmonic Reactive Power Compensation

WANG Baihuai¹, WU Tong^{2,3}, ZHANG Weizheng¹, FANG Xuezheng¹, LI Yingzhi¹

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company Training Center, Tianjin 300181, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Shenyang 110819, Liaoning, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited
Economic Research Institute, Shenyang 110015, Liaoning, China)

Abstract: In order to enhance the stability of power grid operation and improve power supply capacity of power grid, a power supply capacity simulation method based on harmonic reactive compensation was proposed. The harmonic data in the power network equipment was calculated through DIgSILENT/PowerFactory software, including generator, transformer, load, transmission line, shunt capacitor bank and other harmonic parts; according to the acquired harmonic data, the active power filter (APF) as the core was combined with static var compensator (SVC), so that the thyristor switched capacitor (TSC) and the APF connected by the H bridge were connected with the grid, and the inductance parameter was set to realize current tracking; according to the open-loop control, TSC and APF were worked in parallel under stable conditions; through TSC's autonomous classification, the constantly changing reactive power was compensated, and APF was used to compensate again the parts that cannot be completed between different levels, so as to complete the comprehensive suppression of harmonic reactive power compensation in the grid. The simulation results show that the proposed method can effectively suppress the harmonics, and the harmonic current content is within the range of national standard value, effectively enhance the power supply performance of the grid.

Key words: harmonic reactive power compensation ; grid power supply capacity ; active power filter(APF); static var generator(SVG); DIgSILENT / PowerFactory software ; harmonic data

基金项目: 国家电网公司 2019 年第一批总部科技项目: 雄安新区综合能源服务系统的市场集成交易与典型业务生产模拟、效益评价方法研究(5222JJ190002)

作者简介: 王佰淮(1988—), 男, 硕士, 工程师, Email: xianyuanyanzhan68@163.com

电力企业是国民经济的重要支柱产业,电能质量关乎国计民生。为人们提供高质量的电能,是目前电力企业的主要工作任务^[1]。其中,谐波是现阶段影响电能质量的主要因素之一。在工业生产中,大功率机械产生的负荷接入电网后,引起电网电压和电流的畸变,使电流中产生大量谐波^[2]。谐波的存在易导致电力设备等出现误操作,导致用电事故的发生。同时,接入电力系统的负荷功率因数较低,常常引起用户的无功不足,导致电量增大、发电频率降低等问题,影响电能的质量。在实际操作中,电网中分布节点较多,支路分布十分广泛,难以完全利用实际测量得到谐波整体分布情况^[3]。为此,如何提高电能质量、提高电网供电能力成为当前该领域研究的热点问题。

文献[4]提出一种完全分布式的无功优化算法。该方法在无中心协调器的状态下获得配电网非凸问题的全局最优解,然后采用二阶二次曲线对其进行收敛,在交替方向乘子算法基础上,将区域进行划分,解决相邻区域间边界信息交换量较小的问题,采用变罚参数对二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)进行了扩展。该算法的收敛性较好,但对大规模的谐波计算存在一定局限性。文献[5]提出电压无功控制方案的双时标协调方法。该方法对电压无功调节慢控装置和快控装置进行调节。慢控制使不确定参数在预定范围内发生变化,快速控制保持系统电压的稳定性和安全性。采用列生成算法构建求解模型,在此基础上确定快速控制机制。该方法可有效提升电网供电能力,但对电网中谐波抑制的能力欠佳。

基于上述问题,提出基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真方法。通过对电网装置中谐波的获取,构建电网输电线路分布参数模型,通过对电流的跟踪等,完成电网供电能力分析。仿真结果表明,采用所提方法可有效抑制谐波,且可有效提升电网供电能力,为电网均衡发展和提升电网供电能力提供可靠支撑。

1 电网装置中谐波获取

为了有效获取电网谐波数据,本文采用DIgSILENT/PowerFactory软件^[6]计算电网中各装置谐波。DIgSILENT/PowerFactory软件是一款综合应用性能较强的电力系统分析软件。电网装置中

包含多种谐波源,对DIgSILENT/PowerFactory软件的基本功能进行开发,能够实现电网谐波潮流计算。

DIgSILENT谐波分析单元能够仿真各种谐波电流源以及电压源。DIgSILENT能够构建系统各种模型,其中,三相模型不仅能够适用于对称网络中,还可用于不对称的网络中,该模型当前在实际工程中被普遍应用^[7]。

本文研究非线性负载对电网的影响,非线性负载包括瞬时冲击性电流、非线性复杂电流和周期性非线性电流。在日常生活中,电子设备中将不控整流桥作为直流变换装置,导致输出电流时产生一定的谐波。电网的负载类型为容性负载,对本文研究的提升电网能力具有一定帮助。

1.1 外部电网线路阻抗

在外部电网中包含负荷和变压器等,计算谐波潮流过程中,外部电网的阻抗通过短路容量进行相应描述,其短路容量幅值和相角根据线路阻抗计算获取^[8]。

1.2 发电机等效电路谐波阻抗

该部件电势仅在基波网络中存在^[9]。在分析谐波时,发电机谐波电势值为0,其谐波等效电路是电阻和电感串联模式,等效电路谐波阻抗值通过下式计算:

$$D_c(k) = Y_c(k) + \mu L_c(k) \quad (1)$$

式中: $D_c(k)$ 为等效电路谐波阻抗值; $Y_c(k)$ 为谐波阻抗值; μ 为谐波电压相对振幅; $L_c(k)$ 为谐波电抗。

$L_c(k)$ 利用直轴与交轴次暂态电抗均值予以描述,其可通过下式进行计算:

$$L_c(k) = k \frac{P'_i + P'_j}{2} \quad (2)$$

式中: k 为谐波次数; P'_i, P'_j 分别为不同谐波电压初始相位值。

发电机中,谐波的电阻值较小,通常情况下可忽略不计。

通过式(1)计算得到发电机等效阻抗值,在计算谐波潮流时,发电机的等效电路是发电机端点经等效阻抗和电网中性点互连^[10]。

1.3 变压器等值电路谐波等效阻抗

DIgSILENT给出了各种各样的变压器模型,在谐波次数较少时,可忽略变压器的绕组和绕组中间匝电容。变压器等值电路是一个阻抗支路^[11],谐波等效阻抗 U_T 计算方式为

$$U_T(k) = \sqrt{kY_T(k)} + \mu k L_T(k) \quad (3)$$

式中: $L_T(k)$ 为高低压绕组基波漏抗; $Y_T(k)$ 为基波下绕组的电阻值。

1.4 负荷基波等值阻抗

在谐波潮流计算时,针对综合负荷所生成的谐波源被当作注入谐波电流予以考虑,剩余负荷视为恒定阻抗予以考虑,负荷基波等值阻抗根据给定负荷功率计算得到:

$$\varphi_M = R_M + \mu L_M = \frac{U^2}{\xi - \mu \vartheta} \quad (4)$$

式中: R_M 和 L_M 分别为负载电阻和电容; ξ 为综合负荷基波有功功率; ϑ 为无功功率; U 为综合负荷基波端电压值。

1.5 电网输电线路分布参数模型

DIgSILENT内部架空线主要有集中参数模型和分布参数模型两种。分布参数模型适合在长输电线路应用,根据双曲线函数^[12]描述 π 型等值电路,可通过下二式进行计算:

$$\eta = \eta_c \times \sin(k\gamma) \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\cos(k\gamma - l)}{\eta_c \times \sin(k\gamma)} \quad (6)$$

式中: η, σ 分别为实际阻抗和变压器变比; η_c, γ 分别为 k 次谐波下线路波阻抗和传播常数; l 为输电线路长度。

η_c, γ 可通过下2式进行计算:

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\eta'}{\sigma'}} \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{\eta' \sigma'} \quad (8)$$

式中: η', σ' 分别为 k 次谐波下线路单位阻抗和导纳。

1.6 并联电容器组谐波阻抗值

如果负荷点外存在相对大容量的无功补偿装置,此时电容阻抗特性与电感截然不同,所以将其从综合负荷中隔离并当作独立支路对待。其谐波阻抗值计算式为

$$\varepsilon_c(k) = U_c^2 / (k\vartheta_c) \quad (9)$$

式中: U_c 为电容器组额定电压值; ϑ_c 为电容器组容量。

针对综合非线性负荷生成的谐波源,根据谐波电流源进行描述。电网中谐波电压根据谐波电压源描述。电网谐波源内阻抗通常大于系统阻抗,其生成的谐波电流大小仅取决于其工作环境与外加电压。在 DIgSILENT 软件中,包含谐波电流源和电压源模型,缺省模型中能够基于实际

数据对谐波幅值和相位进行设置,并随机组合不同谐波源,满足基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真研究需求。

2 谐波抑制与无功补偿

2.1 电流跟踪

通过上述电网谐波的获取,采用谐波抑制与无功补偿的综合装置进行仿真。在主电路结构连接方式中,本文选择的静止无功发生器(static var compensator, SVC)使用固定电容与晶闸管投切互为组合模式,有源滤波器(active power filter, APF)选择 H 桥式连接方式^[13]。

计算无功补偿装置有源部分 APF 补偿容量及输出参数,即对 APF 容量 S 进行计算:

$$S = 3EI \quad (10)$$

式中: E 为电网相电压的有效值; I 为电流的有效值。

补偿容量和补偿电流值存在相关性,假设电流值补偿谐波有效值为 I_h , 补偿目标对象是三相桥式的全控整流器,则 I_h 约为补偿量的 25%。假设同时对无功实行补偿,那么:

$$I = \sqrt{I_h^2 + I_q^2} \quad (11)$$

式中: I_q 为负载电流基波分量的有效值。

综上,能够计算有源电网滤波器电流有效值:

$$I = \frac{S}{3E} \quad (12)$$

假设调制度 $M=1$, 逆变器的输出相电压幅值是 U_{dc} 的 50%, 补偿线电流的有效值 I_c 和 U_{dc} 之间关系可表示为

$$I_c = \frac{\frac{U_{dc}}{2\sqrt{2}} - E}{\omega L} \quad (13)$$

式中: ω 为角频率; L 为电感。

此时,需要输出相应参数。其要求为: APF 串联电感取值应满足补偿电流跟踪要求,进而使补偿电流不受任何影响,顺利通过滤波器。

对要求的电流进行高效跟踪,即需要设置电感参数。满足跟踪要求为

$$\frac{|\Delta i_{up}| - |\Delta i_{down}|}{T} \geq \frac{I_{nm} \sin(n\omega T)}{T} \approx n\omega I_{nm} \quad (14)$$

式中: Δi_{up} 为上拉电流变化值; Δi_{down} 为下拉电流变化值; I_{nm} 为壳架等级额定电流; n 为谐波次数; T 为开关周期。

根据 $L \cdot di/dt = \Delta u$, 可得:

$$\begin{cases} L \frac{\Delta i_{up}}{T_{up}} = \frac{U_{dc}}{2} - u_a \\ L \frac{\Delta i_{down}}{T_{down}} = -\frac{U_{dc}}{2} - u_a \end{cases} \quad (15)$$

式中: u_a 为 a 相电压; T_{up} 为电感电流上升时间; T_{down} 为电感电流下降时间。

与关系式 $\|\Delta i_{up}\| - \|\Delta i_{down}\| \geq \|\Delta i_{up}\| - \|\Delta i_{down}\|$ 结合, 可获得电感的取值范围为

$$L \leq \frac{U_{dc} - 2u_a}{2n\omega\omega_{nm}} \quad (16)$$

式中: ω_{nm} 为基波频率。

2.2 APF和TSC的综合补偿

通过 APF 主电路使用多组开关管形成 H 桥型的连接形式, 要求同相开关组中固定一个为连通状态。此时, 电流由逆变器中流出的方向和补偿电流的方向完全相反, 同时, 要求交流侧电压峰值比直流侧电容电压值小, 当各相需要导通时, 则电感电流呈增大趋势, 相反则会减小^[14-15]。

假设一组开关管导通的补偿电流为线性上升变化形式, 直到上升至正常值, 则开关管会自主关断, 由此一个完整工作周期完成。

针对整个系统而言, 不仅要考虑到 APF 和 TSC 单独正常运行, 还需要考虑联合工作时出现的稳定性问题。其中, 有源滤波器主要负责对负载与 TSC 实行无级差补偿, 使用滞环控制方式。TSC 使用三角形接法, 检测无功电流使用, 对无功实行大容量分级补偿, 根据开环控制, 保障 TSC 和 APF 在稳定情况下并行工作。除此之外, 当 TSC 电抗率一致, 同时电抗率足够大时, 那么检测网侧电流的闭环控制呈现出补偿特性, 比检测负载电流的开环控制效果更好。

图 1 为综合装置控制方案运行原理。

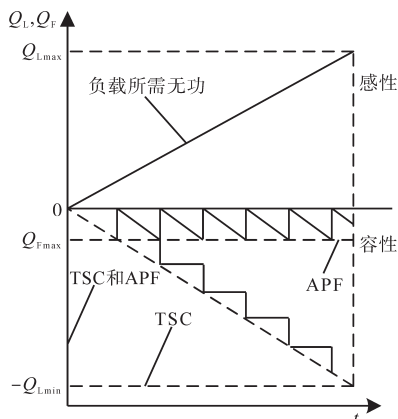


图 1 APF 和 TSC 综合补偿的基本原理

Fig.1 Basic principle of APF and TSC comprehensive compensation

根据图 1 可知, TSC 会自主式分级对不断变化的无功实行补偿, 各级之间无法完成部分利用 APF 再次补偿, APF 将高效精准地抑制谐波电流, 增强电网供电能力。

对 APF 检测网侧电流的整个过程进行控制的方法如图 2 所示。

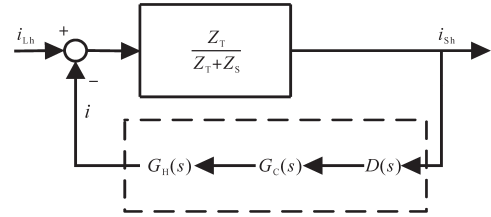


图 2 APF 检测网侧电流控制过程

Fig.2 APF detection network side current control process

图 2 中, i 为网侧电流; i_{Lh} 为负载电流中谐波分量的有效值; i_{sh} 为电网电流补偿值; Z_T 为 APF 等效阻抗; Z_S 为电网等效阻抗; $G_h(s)$ 为主电路逆变器 PWM 环节生成的传递函数; $G_c(s)$ 为 APF 电流控制器; $D(s)$ 为谐波电流检测算法的传递函数。假设 Z_1, Z_2 为电网与 TSC 等效阻抗, L_s 为电网阻抗, R_T 为等效电阻, L_T 为 TSC 中串联电抗, C_T 为 TSC 中投入的补偿电容, 由此得到 $Z_1 = L_s s$, $Z_2 = R_T + L_T s + 1/(C_T s)$ 。在闭环控制条件下对 APF 检测网侧电流。

在 APF 检测负载电流过程中, 其控制结构如图 3 所示。

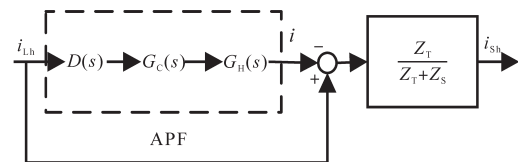


图 3 负载电流检测控制

Fig.3 Load current detection control

图 3 中, $G_c(s) = 1$, 从理论上能够完全补偿无功与谐波。此时系统在开环环境下运行相对稳定, 但还会存在延时问题, 此时需对电流进行控制。通过上述分析, 完成基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真研究。

3 实验分析

3.1 实验环境

将 DIgSILENT/PowerFactory 软件与 Matlab 软件结合, 将基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真方法用在下列工况中, 对所提方法进行验证。实验数据来源于某电力公司。其中, DIgSILENT/PowerFactory 软件和 Matlab 软件的接口采用间接

调用方式进行连接,这样可使二者之间进行有效协调,完成电网数据的交流和传输,其运行流程如图4所示。

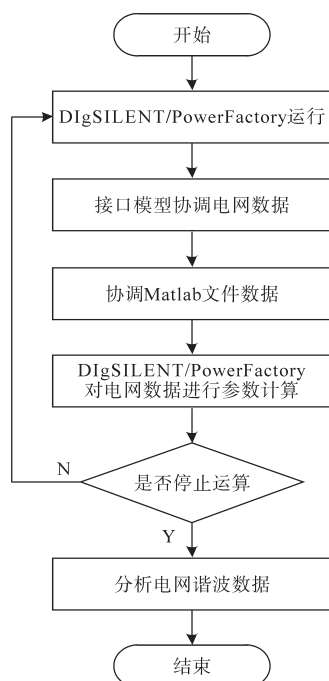


图4 DIgSILENT和Matlab软件的接口运行流程

Fig.4 DIgSILENT interface running process of Matlab software

3.2 仿真参数

仿真参数设置如下:电网电压值1140V;直流侧并联电阻80Ω,110Ω;接口电感6mH;直流侧电压给定值600V;载波频率4kHz;低压侧母线运行电压0.4kV。

在上述参数基础上,采集了待检测的目标信号,并对样本目标信号进行训练,以保证实验的可靠性,训练后的样本信号电流波形如图5所示。

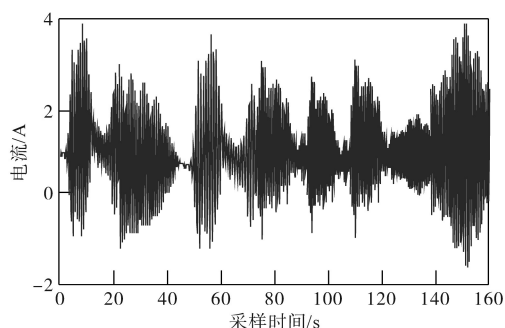


图5 样本信号电流波形

Fig.5 Sample signal current waveform

3.3 结果分析

3.3.1 谐波无功补偿后电流波形变化

为了验证所提方法的科学有效性,实验分析了所提方法、非线性负载下多变流器谐波电压补偿控制以及并网型光伏系统无功电压稳定性控

制方法对电网中存在的谐波进行无功补偿,实验结果如图6所示。

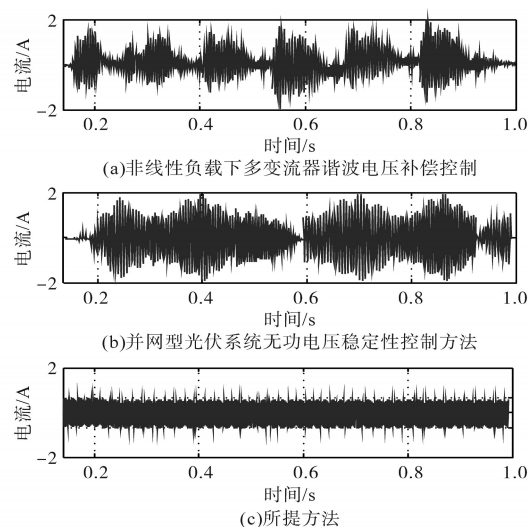


图6 不同方法谐波无功补偿后波形变化

Fig.6 Waveforms change after harmonic reactive power compensation by different methods

分析图6可以看出,采用所提方法对样本信号电流波形进行处理后,样本信号的波形转化为波动频率相同且均匀的正弦波形,而采用其他两种方法处理后的波形存在一定程度的波动,说明所提方法可有效抑制电流中的谐波,抑制能力较强,验证了所提方法可有效改善电网供电能力。

3.3.2 谐波无功补偿后电网响应速度

为了验证所提方法可有效提高电网供电能力,实验分析了所提方法、非线性负载下多变流器谐波电压补偿控制以及并网型光伏系统无功电压稳定性控制方法在谐波无功补偿后电网的响应速度,实验结果如图7所示。

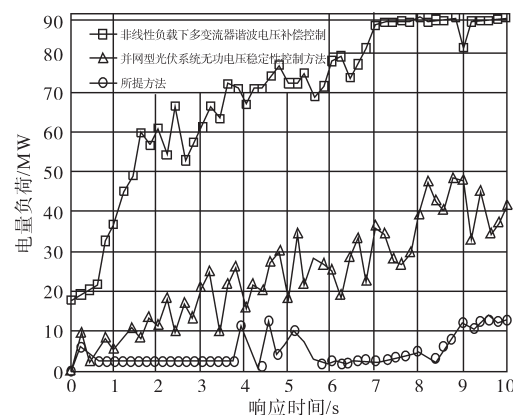


图7 谐波无功补偿后电网响应速度分析

Fig.7 Response speed analysis of power grid after harmonic reactive power compensation

分析图7可知,随着电量负荷的增加,三种方

法谐波无功补偿后电网响应速度存在一定差距。其中,所提方法的响应用时最短、速度最快,而其他两种方法的响应耗时较长,验证了所提方法的科学有效性。

3.3.3 网侧电流与负载侧电流波形分析

为了进一步验证所提方法的可靠性,对电网运行过程中网侧电流与负载侧电流波形进行谐波无功补偿处理。

网侧电流与负载侧电流变化曲线实验结果如图8所示。

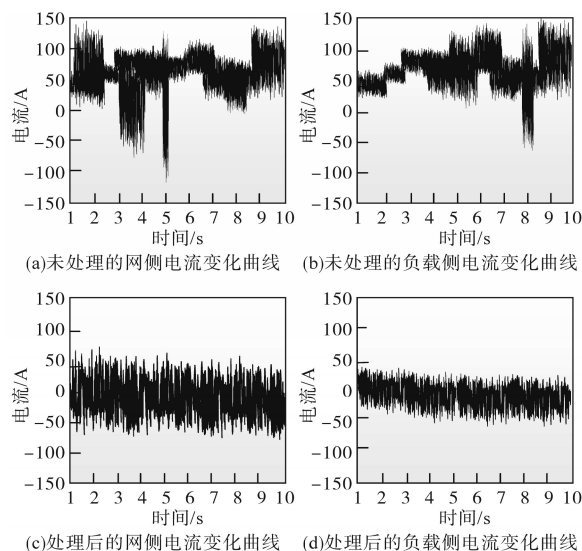


图8 网侧与负载侧电流变化曲线

Fig.8 Current change curves of grid side and load side

分析图8可知,未经过处理的网侧电流和负载侧电流随着时间的变化呈现不规则的波动,这是由于电流中存在一定的谐波,干扰电流的变化。

采用所提方法对网侧电流和负载侧电流中的谐波进行抑制,处理后的电流变化较为均匀,且在一定电压范围内运行,验证了所提方法的可靠性。

4 结论

随着社会经济的不断发展,电网供电能力的提升至关重要。为此,提出基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真方法,通过对用电设备中谐波的提取,采用综合控制装置对谐波进行抑制等方法,提升了电网供电能力。

仿真结果表明:所提方法能有效抑制电网中谐波,保障电网正常运行。

参考文献

- [1] 顾苏雯,马宏忠,王华芳,等.基于动态多种群粒子群算法的低压配电网电压无功优化[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):91-96.
Gu Suwen, Ma Hongzhong, Wang Huafang, *et al.* Voltage reactive power optimization on low voltage distribution network based on dynamic multi-swarm particle swarm optimization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):91-96.
- [2] 赵前扶,于擎,王圣钧,等.0.4 kV配电网无功补偿多点配置研究[J].电测与仪表,2018,55(11):41-44,57.
Zhao Qianfu, Yu Qing, Wang Shengjun, *et al.* Research on reactive power compensation multi-point configuration of 0.4 kV distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(11):41-44,57.
- [3] 胡巧辉,樊艳芳,王一波.基于光-储-燃的直流微电网协调控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):138-143,149.
Hu Qiaohui, Fan Yanfang, Wang Yibo. DC micro-grid coordinated control strategy based on PV, BES and FC [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):138-143,149.
- [4] Zheng Weiye, Wu Wenchuan, Zhang Boming, *et al.* A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):1021-1033.
- [5] 黄现莲,冯向东,张新闻.QPR控制器参数对变流器弱电网适应能力的影响[J].电气传动,2020,50(2):28-34.
Huang Xianlian, Feng Xiangdong, Zhang Xinwen. The effect of the quasi proportional resonant controller's parameters on the adaptability of the converter to the weak grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(2):28-34.
- [6] 许柳,吕智林,孟泽晨,等.非线性负载下的多变流器谐波电压补偿控制策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):1-11.
Xu Liu, Lü Zhilin, Meng Zechen, *et al.* Multi-converter harmonic voltage compensation control strategy under nonlinear loads[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7):1-11.
- [7] 刘中原,王维庆,王海云,等.并网型光伏系统无功电压稳定性控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(6):130-137.
Liu Zhongyuan, Wang Weiqing, Wang Haiyun, *et al.* Study on the control strategy of reactive power voltage stability of grid-connected PV system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):130-137.
- [8] 谢星宇,唐欣,曾鑫鑫.基于控制网侧电流的光伏并网变流器控制策略[J].电力电子技术,2018,52(7):103-105.
Xie Xingyu, Tang Xin, Zeng Xinxin. Control strategy of grid current for a photovoltaic grid-connected converter[J]. Power

- Electronics, 2018, 52(7):103-105.
- [9] 马文飞, 吴孔平. 基于李雅普诺夫稳定性的微电网分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(12):27-31.
Ma Wenfei, Wu Kongping. Analysis method of micro-grid based on Lyapunov stability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(12):27-31.
- [10] 李刚, 冯振乾, 赵宝康, 等. 一种面向空地一体化组网的体系架构[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(9):1797-1802.
Li Gang, Feng Zhenqian, Zhao Baokang, *et al.* An architecture for integrated spatial-terrestrial networks[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(9):1797-1802.
- [11] 陈静, 涂梦洁, 王一飞, 等. 大容量无功快速补偿方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6):1-6.
Chen Jing, Tu Mengjie, Wang Yifei, *et al.* Study on high capacity reactive power fast compensation method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):1-6.
- [12] 贾先平, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 含柔性负荷的主动配电网优化模型研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 46-52, 116.
Jia Xianping, Zou Xiaosong, Yuan Xufeng, *et al.* Study on optimal model of active distribution network with flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(13): 46-52, 116.
- [13] 韩忠明, 毛锐, 郑晨烨, 等. 一种有效的动态网络节点影响力模型[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7):1960-1964.
Han Zhongming, Mao Rui, Zheng Chenye, *et al.* Effective model for measuring node influence on temporal network[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(7): 1960-1964.
- [14] 盖阔, 安群涛, 孙力. 基于多重比例谐振的动态电压恢复器谐波补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):156-161.
Gai Kuo, An Quntao, Sun Li. Harmonic compensation strategy of dynamic voltage restorer based on multiple proportional resonant[J]. Application Research of Computers, 2018, 38(1): 156-161.
- [15] 徐小虎, 夏昌龙, 郭志伟, 等. 啁啾场调控的高次谐波空间分布及孤立阿秒脉冲产生[J]. 中国激光, 2018, 45(6):34-41.
Xu Xiaohu, Xia Changlong, Guo Zhiwei, *et al.* Spatial distribution of high-order harmonic controlled by chirped laser pulse and isolated attosecond pulse generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6):34-41.

收稿日期:2020-06-17

修改稿日期:2020-10-29

(上接第34页)

- zanejad. Lyapunov theory combined with small signal linearization for regulated operation of a hybrid DC/AC microgrid[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-06-10) [2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12497>.
- [9] Prashant Singh, Jagdeep Singh Lather. Variable structure control for dynamic power-sharing and Voltage regulation of DC microgrid with a hybrid energy storage system[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-06-30)[2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12510>.
- [10] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.
Dong Jijun, Chen Hao, Zhou Xuesong, *et al.* Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.
- [11] Cucuzzella M, Trip S, De Persis C, *et al.* A robust consensus algorithm for current sharing and voltage regulation in DC micro-grids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(4): 1583 - 1595.
- [12] Ni Hui, Xu Xiaolu, Hao Gong, *et al.* Design of fast fault diagnosis system for transformer equipment based on CBR and RBR[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(5):26-31.
- [13] Satish Gaurav, Vibhuti Nougain, Bijaya Ketan Panigrahi. Protection of low-voltage DC microgrid based on series R-L-C equivalent circuit utilizing local measurements[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18):3877-3885.
- [14] Rajesh J Sevugan, Karthikeyan R, Revath R, *et al.* Hybrid DPSO based MPPT control of high static gain converter in photovoltaic system for DC microgrid applications[C]/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- [15] 王民华, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):215-220.
Wang Minhua, Li Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 215-220.

收稿日期:2020-10-27

修改稿日期:2020-11-16