

光伏多功能并网逆变器不同出力状态下 无功和谐波优化方法

王 果¹, 武 旭¹, 李 龙², 张梦圆¹, 李旭哲^{1,3}, 成 柯^{1,3}, 张建雄¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 青岛鼎信通讯股份有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:利用光伏多功能并网逆变器所具有的电能质量治理、谐波谐振抑制的主动优势,结合逆变器在不同出力状态下光伏发电系统的输出特性,构建光伏多功能并网逆变器不同出力状态下的无功和谐波优化方法。在所提3层优化策略中,上层优化策略以光伏并网有功功率最大化为目标函数,中层优化策略以电压谐波总畸变率和电压偏差达到相应电能质量规定指标为目标函数,下层优化策略以电压谐波总畸变率和电压偏差最小为目标函数,并采用自适应蚁群算法进行求解。基于IEEE 33节点系统进行算例分析,结果表明:基于逆变器不同出力状态的优化方法可以有效改善电网的电能质量,较好地提升电网运行的经济性;在系统稳定运行的基础上,光伏多功能并网逆变器在不同出力状态下分阶段、分主次地治理谐波和调整电压偏差,治理效果更佳。

关键词:光伏发电系统;多功能并网逆变器;优化策略;无功优化;谐波治理

中图分类号:TM615;TM464

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202212022

0 引言

为了实现“双碳”目标,太阳能、风能等新能源发电替代传统发电模式已成为必然趋势。截至2020年底,我国累计光伏(photovoltaic, PV)并网装机容量达到253 GW,同比增长23.5%,全年PV发电量达到 2.605×10^{11} kW·h,同比增长16.2%,占我国全年总发电量的3.5%,同比提高了0.4%^[1]。分布式PV、大量电力电子设备以及非线性负荷随机接入,产生的谐波、电压波动等对电网的电能质量产生了巨大的挑战,加之分布式PV的出力具有不确定性和随机性, PV并网和冲击性负荷给供电安全及电力系统稳定性带来了严重的威胁^[2-3]。

针对PV并网时存在的电能质量问题,常见的解决措施包括加装有源电力滤波器(active power filter, APF)、动态调压器等功率控制装置,设置电容器、动态无功补偿器等无功补偿装置^[4]。目前,已有较多关于电能质量主动优化方面的研究:文献[5]为

了实现电网的经济运行,缓解微电网内不同种类微源的波动性给电网调度所带来的干扰,提出了一种有功-无功协调控制的双层优化调度模型;文献[6-7]考虑PV电池的输出特性和谐波补偿对光伏多功能并网逆变器(photovoltaic multi-function grid-connected inverter, PVMFGCI)容量分配的影响,分情况建立了谐波治理优化策略,并采用模拟退火粒子群优化算法进行求解;文献[8-10]通过控制策略提取相应的电流、电压信息,并生成相应的目标电流、电压,实现了利用逆变型分布式发电(distributed generation, DG)有功功率并网后逆变器的剩余容量对微电网的并网节点进行电能质量治理,集成并网功能与APF功能,在完成DG有功功率并网的同时,可实现谐波治理和无功功率补偿;文献[11-13]针对不同情况的应用需求,引入相应的控制策略,在谐波补偿、负载不平衡补偿、无功功率分散化治理方面取得了较好的效果,同时实现了有功功率并网;文献[14]提出了一种微源并网逆变器参与电能质量控制的补偿策略,以实现并网点电能质量综合指标最优为目标,对微电网的电能质量情况进行负载谐波、无功功率、不平衡电流跟踪补偿。由上述分析可知,利用PVMFGCI进行谐波抑制、电压偏差优化方面的研究已较成熟,但大多研究忽略了PV在非工作状态(夜晚)的输出功率为0情况下逆变器处于空闲状态,逆变器容量可全部用于电能质量治理;当PV处于工作状态时,未考虑PVMFGCI不同出力状态下剩余容量的大小,在4种典型气象条件(晴朗、雨天或雪天、多云、多变天气)下逆变器的剩余容量差异较

收稿日期:2022-05-17;修回日期:2022-09-07

在线出版日期:2023-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867012);甘肃省教育厅2021年青年博士基金资助项目(2021QB-058);甘肃省重点研发计划项目(21YF5GA159);兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51867012), the 2021 Young Doctor Fund Project of Gansu Provincial Department of Education(2021QB-058), the Key R&D Plan Program of Gansu Province(21YF5GA159) and the “100 Young Talents Training Program” of Lanzhou Jiaotong University

大,如何分配PVMFGCI谐波补偿、无功功率补偿的占用容量,直接影响电网运行的经济效益。

为此,本文综合考虑PVMFGCI谐波、无功功率补偿量和有功功率并网量之间存在的矛盾,构建了PVMFGCI处于工作状态(考虑气象条件)和非工作状态(夜晚)下的电能质量治理动态优化方法。由于PVMFGCI处于工作状态时的剩余容量存在差异,首先在多云、多变天气、晴朗气象条件下建立双层优化策略,在满足上层有功功率并网需求的同时,以电能质量达标为中层的优化目标。然后,考虑PVMFGCI处于非工作状态(夜晚)以及雨天、雪天气象条件下剩余容量充足,在双层优化策略的基础上,以各节点谐波畸变率和电压偏差最小为下层优化目标,从而最大化、最合理地利用PVMFGCI,使PV并网时的电能质量最优。最后,采用自适应蚁群算法快速、精确地求解3层优化策略,并进行了算例仿真验证。

1 PVMFGCI的控制结构与输出特性

典型的PVMFGCI控制结构如图1所示,其主要由PV阵列、升压电路、直流侧电容 C_{PV} 、逆变器、滤波器、三相电压 u_{sabc} 、PVMFGCI功能外环和电流内环控制电路、驱动电路等构成^[15-16]。图1中: C_{dc} 为直流侧电容; L_1 、 L_2 分别为LCL滤波器前、后侧电感; C 为LCL滤波器电容; i_{1abc} 、 i_{2abc} 分别为滤波器前侧电流、并网侧电流; u_c 、 i_c 分别为滤波器电容电压、电流; u_{PV} 、

i_{PV} 分别为直流侧电压、电流; L_0 为直流侧电感,其与直流侧电容 C_{PV} 组成升压电路; V_{Q1} — V_{Q6} 为逆变器桥臂开关管,与二极管 V_{D1} — V_{D6} 组成三相光伏逆变器。

PV阵列将太阳能转换为直流电,升压电路将直流电抬升到允许并网逆变的电压; C_{PV} 实现功率之间的解耦;三相逆变器将直流电转换为交流电并入电网;LCL滤波器用于滤除高次谐波。PVMFGCI的基本控制策略为双环控制策略,即功能外环控制、电流内环控制。功能外环包括功率控制模块、电能质量检测模块两部分:功率控制模块根据输入计算电流内环的参考电流 I_d 、 I_q ;电能质量检测模块根据 i_{2abc} 计算实现电能质量治理所需的电流内环参考值 i^* ,电流内环对功能外环计算所得两部分电流内环参考值进行跟踪,再经驱动电路送入空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)。

根据我国气象局发布的GB/T 22164—2008标准,将气象条件划分为晴朗、雨天或雪天、多云、多变天气4种。4种典型气象条件以及非工作状态(夜晚)下PV发电系统的典型输出功率曲线如附录A图A1所示。由图可知,非工作状态(夜晚)下PV输出功率为0,雨天或雪天气象条件下PV输出功率很小,但随着气象条件转变为多云、多变天气、晴朗时,PV阵列所受光照强度增加,PV输出功率也逐渐抬升。在相同的PV发电系统下,辐照度会直接影响PV输出功率的大小,随着辐照度的增加,PV输出功

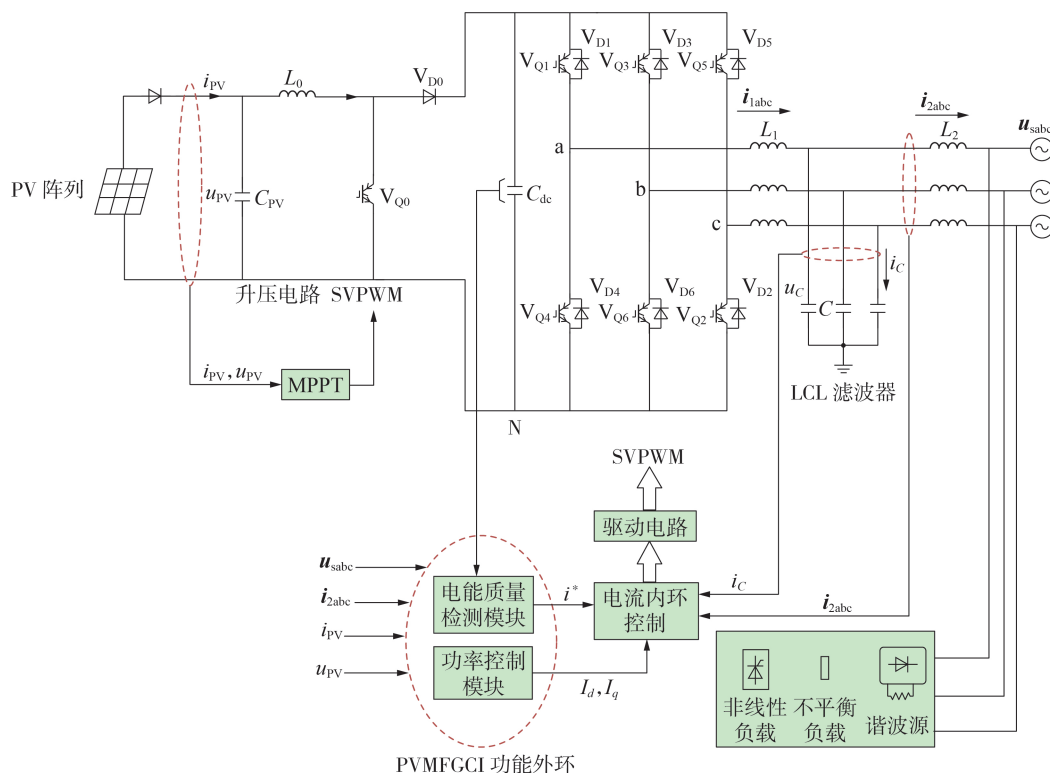


图1 PVMFGCI控制结构图

Fig.1 PVMFGCI control structure diagram

率逐渐增加。综上可知:PVMFGCI在工作状态下的剩余容量不同,应建立适应PVMFGCI不同出力状态的优化方法;同时,PVMFGCI在非工作状态(夜晚)下的容量全部剩余,可全部用于电能质量治理,应使其利用率最大化。

因此,当PVMFGCI的并网有功功率 P_M 小于逆变器总容量 S_M 的40%时,建立3层优化方法;当40% $S_M \leq P_M < 80\% S_M$ 时,建立双层优化方法;当80% $S_M \leq P_M < S_M$ 时,需考虑逆变器的安全裕度,此时只考虑并网有功功率而不考虑谐波和无功功率优化。PVMFGCI在不同出力状态下的优化方法具体如表1所示。这样既可以充分利用PVMFGCI的剩余容量进行谐波和无功功率优化,大幅度提高逆变器的利用率,又能降低PV并网系统电能质量治理装置(如APF)的投资和运行成本^[17]。

表1 PVMFGCI在不同出力状态下的优化方法

Table 1 Optimization methods of PVMFGCI under different output conditions

PVMFGCI状态	判定条件	优化方法
非工作状态	$P_M < 40\% S_M$	3层优化
工作状态	$40\% S_M \leq P_M < 80\% S_M$	双层优化
工作状态	$80\% S_M \leq P_M < S_M$	不优化谐波和无功功率

2 电流分量检测

为了实现PVMFGCI的谐波和无功功率优化,需提取谐波电流、无功功率信号。本文采用改进的功率守恒理论(conservative power theory, CPT)电流检测法^[18]提取指令电流,改进的CPT电流检测方法的原理如图2所示。图中: u_a, u_b, u_c 和 i_a, i_b, i_c 分别为三相电压和三相电流; u_α, u_β 和 i_α, i_β 分别为 α, β 相电压和电流; P 为有功功率; W 为电能; P_α 为 α 相有功

率; W_α 为 α 相电能; U 为电压均方根值; U_α 为 α 相电压均方根值。

以提取无功、有功电流分量为例:将三相电压及电流从 abc 坐标系变换至 $\alpha\beta$ 坐标系,从而简化电流计算。对于三相系统而言,三相电压 u_a, u_b, u_c 和三相电流 i_a, i_b, i_c 满足以下约束条件:

$$u_a + u_b + u_c = 0, \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1)$$

根据Clark逆变换,分别得到三相电流 i_a, i_b, i_c 和三相电压 u_a, u_b, u_c 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流 i_α, i_β 和电压 u_α, u_β ,如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $C_{abc/\alpha\beta}$ 为Clark逆变换矩阵。

由式(1)和式(2)计算可得:

$$\begin{cases} i_\alpha^2 + i_\beta^2 = i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 \\ u_\alpha^2 + u_\beta^2 = u_a^2 + u_b^2 + u_c^2 \end{cases} \quad (3)$$

再根据CPT^[19-20]可得总电流值 i 为:

$$i = \sqrt{(i_{\mu\mu}^b)^2 + (i_{\mu\mu}^u)^2 + (i_{\mu\nu}^u)^2 + (i_{\mu\nu}^b)^2 + i_{\nu\mu}^2} \quad (4)$$

式中: $\mu = \alpha, \beta$; $i_{\mu\mu}^b, i_{\mu\mu}^u$ 分别为对称、不对称有功电流分量; $i_{\mu\nu}^b, i_{\mu\nu}^u$ 分别为对称、不对称无功电流分量; $i_{\nu\mu}$ 为空电流分量。

在 $\alpha\beta$ 坐标系下分解式(4)可得:

$$\sum_{\mu=\alpha,\beta} (i_{\mu\mu}^b)^2 + \sum_{\mu=\alpha,\beta} (i_{\mu\mu}^u)^2 + \sum_{\mu=\alpha,\beta} (i_{\mu\nu}^u)^2 + \sum_{\mu=\alpha,\beta} (i_{\mu\nu}^b)^2 = \sum_{\nu=a,b,c} (i_{\nu\nu}^b)^2 + \sum_{\nu=a,b,c} (i_{\nu\nu}^u)^2 + \sum_{\nu=a,b,c} (i_{\nu\mu}^u)^2 + \sum_{\nu=a,b,c} (i_{\nu\mu}^b)^2 \quad (5)$$

式中: $i_{\mu\mu}^b$ 为不对称电流分量; $i_{\mu\nu}^b, i_{\mu\nu}^u, i_{\nu\mu}^b, i_{\nu\mu}^u$ 分别为 abc 坐标系下的对称有功电流分量、对称无功电流分量、不对称电流分量、空电流分量。

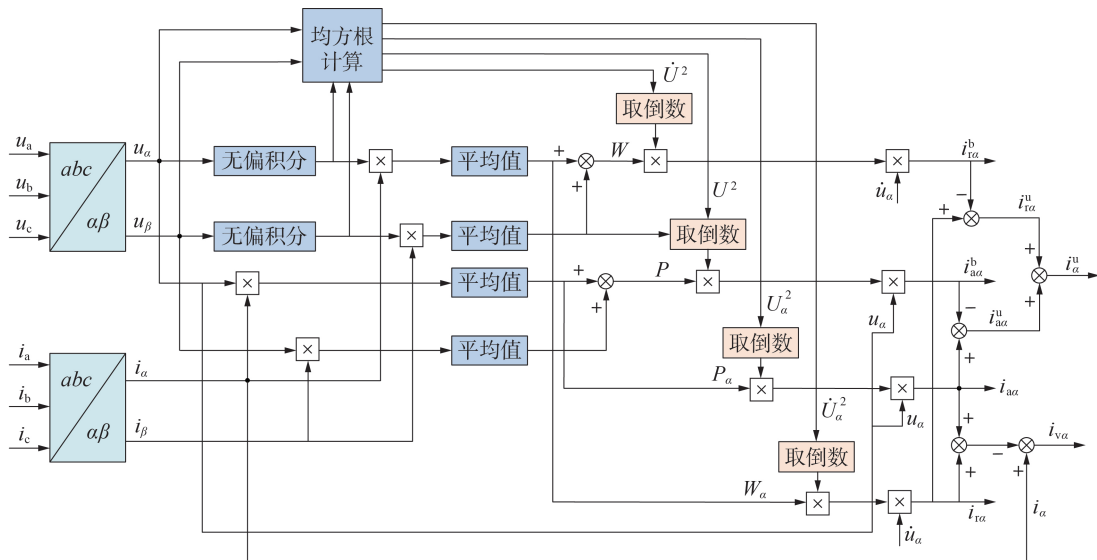


图2 改进的CPT电流检测法的原理(α 相)

Fig.2 Principle of improved CPT current detection method(α phase)

令:

$$\sum_{\mu=\alpha,\beta} (i_{\mu\alpha}^b)^2 = \sum_{\nu=a,b,c} (i_{\alpha\nu}^b)^2 \quad (6)$$

由于所有电流分量 $(i_{\mu\alpha}^b, i_{\mu\beta}^b, i_{\mu\gamma}^b, i_{\mu\delta}^b, i_{\mu\epsilon}^b)$ 都是正交的,则有:

$$(i_{\alpha\alpha}^b)^2 + (i_{\alpha\beta}^b)^2 = (i_{\alpha a}^b)^2 + (i_{\alpha b}^b)^2 + (i_{\alpha c}^b)^2 \quad (7)$$

谐波电流分量的检测提取过程与无功电流分量类似,本文不再赘述。

3 改进的双层优化方法

本章在文献[7]所提双层优化方法的基础上进行改进,基于PVMFGCI不同出力状态的改进谐波和无功功率双层优化方法的思路为:首先,以PV并网有功功率为上层目标;然后,在满足并网有功功率的基础上,进行谐波和无功电流补偿,以使各指标达到电能质量规定的并网标准中层目标。

3.1 上层优化策略

设PVMFGCI的总容量为 S_M ,并网有功功率为 P_M ,谐波治理容量为 S_H ,无功补偿容量为 S_R ,则满足的关系为:

$$S_M^2 \geq P_M^2 + S_H^2 + S_R^2 \quad (8)$$

上层优化策略的目标函数为最大化并网有功功率,使得PV的有功功率尽可能多地并入电网(即最小化PV有功功率削减量),如式(9)所示。

$$\min f_U = \sum_{k=1}^{N_p} \Delta P_{Pk} \quad (9)$$

$$\Delta P_{Pk} = P_{Pk, \max} - P_{Pk} \quad (10)$$

式中: f_U 为上层优化目标函数; N_p 为电网中含有的PV数量; ΔP_{Pk} 为PV k 的有功功率削减量; $P_{Pk, \max}$ 为当前时刻PV k 的实际发电量; P_{Pk} 为经过优化后PV k 的并网有功功率。

由于逆变器的剩余容量有限,PVMFGCI的输出功率不应超过PV发出的最大功率,即需满足潮流约束和逆变器容量上限约束,分别如式(11)和式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{Mi} + P_{Mj} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Mi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{Pk} \leq P_{Pk, \max} \quad (12)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, N 为节点总数; P_{Mi} 、 Q_{Mi} 分别为节点 i 从PV系统获得的有功功率、无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷消耗的有功功率、无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为线路 ij 的电导、电纳。

3.2 中层优化策略

由图A1可以看出,多云、多变天气、晴朗气象条件下PV输出功率较大,因此中层优化策略的目标函

数只考虑电压谐波总畸变率和功率因数达到相应电能质量指标,以避免逆变器满状态运行,给电网带来安全隐患。在上层最大化PVMFGCI并网有功功率的基础上,利用逆变器剩余容量使各节点的谐波含量与功率因数达标,使其满足并网要求。

首先判定不达标节点,筛选出谐波总畸变率不达标节点和功率因数不达标节点,并采取针对性的治理措施;对于不超标的部分,则无须治理。中层优化策略的目标函数可表示为:

$$\begin{cases} \min f_M = f_{M1} + f_{M2} \\ f_{M1} = \sum_{i=1}^{n_i} (\delta_{THD,i} - \delta_{THD,N}), f_{M2} = \sum_{i=1}^{n_i} \gamma_{qi} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \delta_{THD,i} = \frac{I_{Hi}}{I_{Li}} \times 100 \% \\ I_{Hi} = \sqrt{\sum_{h=2}^M I_{hi}^2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\gamma_{qi} = I_{qi} / I_{Li} \quad (15)$$

式中: f_M 为中层优化策略的目标函数值; f_{M1} 为节点谐波治理目标函数值; f_{M2} 为电压偏差治理目标函数值; $\delta_{THD,i}$ 为节点 i 的谐波电流畸变率; $\delta_{THD,N}$ 为PV系统并网规定的节点谐波电压畸变率允许限值; γ_{qi} 为节点 i 的无功系数,为无功功率与基波视在功率之比,即无功电流与基波电流之比; n_i 为经上层优化求解得到的谐波畸变率超标或功率因数不达标的节点数量; M 为谐波畸变的最高频率次数; I_{hi} 为节点 i 处的 h 次谐波电流; I_{Hi} 为节点 i 处的谐波电流含量; I_{qi} 、 I_{Li} 分别为节点 i 处的无功电流、基波电流。

谐波治理与无功补偿需满足逆变器容量约束,即PVMFGCI谐波治理与无功补偿过程中的最大补偿量不能超过逆变器的容量限值,如式(16)所示。

$$S_i \leq k_i S_{Ni} \quad (16)$$

式中: S_i 为节点 i 处PVMFGCI谐波治理与无功补偿总容量; k_i 为节点 i 处PVMFGCI的容量裕度安全系数,以保证谐波治理与电压偏差不超过安全限值; S_{Ni} 为节点 i 处PVMFGCI的额定容量。

4 3层优化方法

雨天或雪天气象条件下,逆变器几乎不输出功率,且在非工作状态(夜晚)下,逆变器的输出功率为0,此时逆变器的剩余容量充足,可基于此建立3层优化模型使PV并网电能质量最优。

虽然经第3章改进的双层优化方法治理后的电能质量能满足并网要求,但仍存在超标风险的节点需进行治理,因此以谐波畸变率和无功补偿量对应的电能质量指标最小为下层优化目标。

4.1 下层优化策略

下层优化策略的目标函数为最小化节点谐波总畸变率和无功补偿量对应的电能质量指标,在上层

和中间优化策略模型的基础上,利用逆变器剩余容量继续治理谐波和优化无功,使并网节点电能质量最优。下层优化策略的关键是筛选出有超标风险以及超标的节点,具体判断方法如下:以规定的注入节点的谐波电流允许值为基准,以上下浮动 $\pm 2\%$ 的谐波电流值和无功补偿值为限,设定具有超标风险的节点。判断表达式为:

$$-\delta_{\text{THD},N} \times 2\% \leq \delta_{\text{THD},j} \leq \delta_{\text{THD},N} \times 2\% \quad (17)$$

$$-\gamma_{qN} \times 2\% \leq \gamma_{qm} \leq \gamma_{qN} \times 2\% \quad (18)$$

式中: γ_{qN} 为标准无功系数。

满足式(17)的节点 j 和满足式(18)的节点 m 被判定为需进行治理的节点。因此,3层优化策略的目标函数为:

$$\begin{cases} \min f_o = f_{1o} + f_{2o} \\ f_{1o} = \sum_{j=1}^{n_j} \delta_{\text{THD},j}, f_{2o} = \sum_{m=1}^{n_m} \gamma_{qm} \end{cases} \quad (19)$$

式中: f_o 为3层优化策略的目标函数值; f_{1o} 、 f_{2o} 分别为谐波治理、无功补偿的目标函数值; n_j 、 n_m 分别为经中间优化策略求解得到的谐波畸变率超标节点数量、功率因数不达标节点数量。

需满足的约束条件包括谐波和无功补偿容量约束,即PVMFGCI在谐波治理与无功补偿过程中的最大补偿量不能超出容量限值,如式(20)所示。

$$S_j \leq k_j S_{Nj}, S_m \leq k_m S_{Nm} \quad (20)$$

式中: S_j 为节点 j 处PVMFGCI谐波治理占用容量; k_j 为节点 j 处PVMFGCI的容量裕度安全系数,以保证谐波治理不超过安全限值; S_{Nj} 为节点 j 处PVMFGCI的额定容量; S_m 为节点 m 处PVMFGCI的无功补偿容量; k_m 为节点 m 处PVMFGCI的容量裕度安全系数,以保证无功补偿容量不超过安全限值; S_{Nm} 为节点 m 处PVMFGCI的额定容量。

将最小化节点电流谐波总畸变率和无功补偿量对应的电能质量指标加入下层优化策略的目标函数中。改进的双层优化方法(式(8)~(16))与3层优化方法(式(8)~(20))之间的交互关系如图3所示。

4.2 优化方法求解

本文采用自适应蚁群算法求解3层优化方法的目标函数,求解流程图如附录A图A2所示,具体求解步骤如下。

1)初始化数据。对IEEE 33节点系统进行编码,输入自适应蚁群算法参数、系统负荷信息、节点谐波含量和无功功率信息、潮流计算相关参数。由PV最大功率点跟踪控制得到并网有功功率的最大值,令其为有功并网量。计算相应节点处PVMFGCI有功功率并网后的剩余容量 S_{R1} 。按照自适应蚁群算法得到邻接支路、已选支路、可选支路集合,将蚂

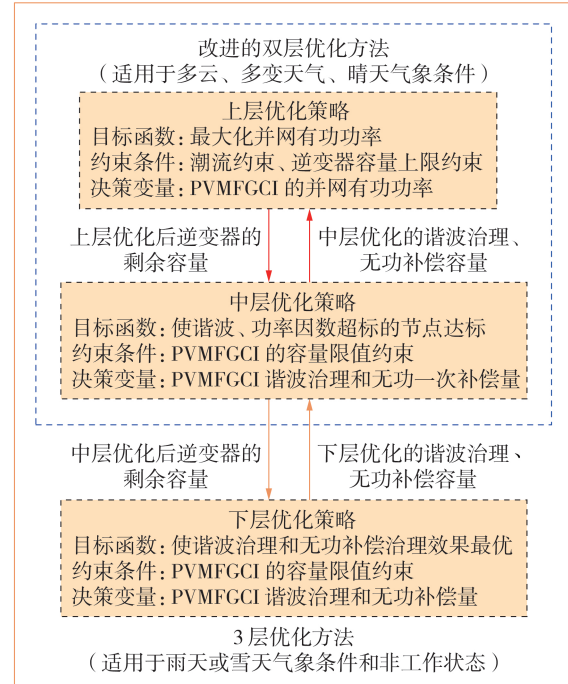


图3 优化方法之间的交互关系
Fig.3 Interaction between optimization methods

蚁放在系统各节点处。

2)以剩余容量 S_{R1} 为中间优化策略的约束条件,计算剩余容量范围内谐波治理和无功补偿的电流值 I_N ,并计算相应节点处PVMFGCI上、中层策略优化后的剩余容量 S_{R2} 。以剩余容量 S_{R2} 为下层优化策略的约束条件,计算剩余容量范围内谐波治理和无功补偿的最大电流值 I_{MAX} 。

3)利用自适应蚁群算法求解谐波治理和无功补偿优化目标函数。

4)计算系统补偿后的节点谐波和无功电流,并检验节点的谐波电压畸变率和无功系数是否分别超出 $\delta_{\text{THD},N}$ 和 γ_{qN} 。若出现节点谐波畸变和无功系数超标,则进入中层优化;若所有节点的谐波畸变率和功率因数都满足要求,则进入下层优化。

5)计算中层优化后各节点的谐波和无功电流并判断具有超标风险的节点。若出现具有超标风险的节点,则进入下层优化;若所有节点的谐波和无功都满足要求,则输出优化求解结果。

5 算例仿真与分析

5.1 算例概述与参数设置

以IEEE 33节点系统为算例验证本文所提优化方法治理电能质量的有效性,设基准电压为10.5 kV,基准容量为20 MV·A,总有功负荷为1665 kW,总无功负荷为2300 kvar。并网节点处PVMFGCI的容量为150 kV·A,PV电池的最大输出功率为120 kW。自适应蚁群算法采用确定性和随机互补的选择方法,

便于更全面地搜索解空间。设迭代总次数 $t_{\text{total}}=150$, 蚂蚁数量为 10 000, 信息素 $Q=0.1$, 信息素影响因子 $\alpha^*=3$, 期望启发因子 $\beta^*=5$, 信息素挥发度 $\rho=0.02$ 。PV 的接入位置为节点 3、7、13、21、31, PVMFGCI 的接入位置与 PV 相同, APF 的安装位置为节点 5、9、16、24、31, 其补偿电流为 40 A, 其余节点为普通节点, 系统拓扑结构如附录 A 图 A3 所示。

5.2 仿真结果分析

并网有功功率的设置如下: $[0.2, 0.3)$ s 时, 给定有功功率为 80 kW; $[0.3, 0.4)$ s 时, 给定有功功率为 40 kW; $[0.4, 0.5]$ s 时, 给定有功功率为 64 kW。采用本文所提 3 层优化方法进行电能质量治理, 治理前、后电网电流波形分别如附录 A 图 A4 和图 A5 所示。由图可看出: 治理前, 并网节点电流的畸变较为严重, 电能质量较差, 在 0.3 s 时非线性负载的变化使电流畸变加剧; 治理后, PV 并网时的电能质量得到很大改善。采用本文所提 3 层优化方法进行无功补偿前、后的功率因数变化曲线如附录 A 图 A6 所示。由图可知: 补偿前, 功率因数在 0.8 以下; 补偿后, 功率因数可达到 0.98, 甚至接近 1, 验证了所提 3 层优化方法具有良好的无功补偿效果。

为更好地验证本文所提优化方法在 PVMFGCI 不同出力状态下的有效性, 设定如下 3 种方案进行对比验证: ①方案 1, 不考虑 PVMFGCI 动态优化, 只考虑 PV 输出功率并网; ②方案 2, 考虑 PVMFGCI 改进的双层优化模型, 分析谐波治理与功率因数是否达标; ③方案 3, 考虑 PVMFGCI 的 3 层优化模型, 分析电能质量是否最优。

3 种方案的谐波畸变率和节点电压偏差结果分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出: 方案 1 的谐

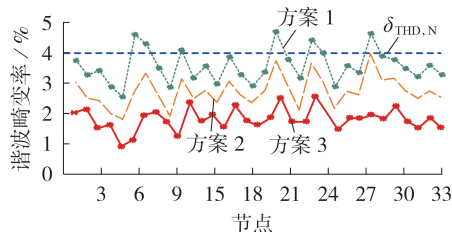


图4 3种方案的谐波畸变率

Fig.4 Harmonic distortion rate of three schemes

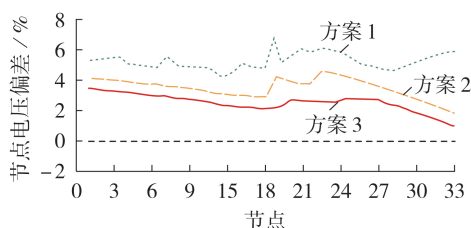


图5 3种方案的节点电压偏差

Fig.5 Bus voltage deviation of three schemes

波畸变率较高, 部分节点甚至超标; 在多云、多变天气、晴朗气象条件下, 方案 2 可有效抑制谐波, 使部分超标节点的谐波畸变率达标, 符合 PV 并网要求, 治理效果较好; 在雨天、雪天气象条件下, 由于逆变器的剩余容量充足, 方案 3 在 3 层优化模型的治理下, 谐波畸变率明显降低, 其治理效果显著。在 IEEE 33 节点系统中, 节点 1 为并网节点, 电压设定为 1.05 p.u.。由图 5 可以看出, DG 有功功率并网会引起节点电压抬升, 方案 3 中节点电压偏差明显降低, 表明本文所提 PVMFGCI 的 3 层优化方法可以在逆变器剩余容量较为充足的条件下进行无功补偿, 使节点电压偏差保持在较好的范围内。同时, 在逆变器剩余容量较为不足的条件下, 方案 2 利用 PVMFGCI 有限的剩余容量进行无功补偿, 也能使电压偏差保持在较好的范围内, 虽然其无功补偿效果不如 3 层优化方法, 但整体可满足 PV 并网的电能质量要求。

5.3 收敛特性分析

本文分别采用自适应蚁群算法、鱼群算法、改进遗传算法求解动态优化模型, 设置蚁群数量、最大迭代次数等参数相同。采用自适应蚁群算法、鱼群算法、改进遗传算法求解的收敛特性如附录 A 图 A7 所示。由图可以看出, 自适应蚁群算法的目标函数适应值最大, 鱼群算法和改进遗传算法次之。自适应蚁群算法、鱼群算法、改进遗传算法分别约经过 30、54、49 次迭代达到收敛, 表明自适应蚁群算法的收敛速度更快, 更适用于求解本文所提动态优化模型。

6 结论

针对 PVMFGCI 不同出力状态下并网后剩余容量存在差异的情况, 本文在 PVMFGCI 剩余容量较为不足的条件下建立电能质量双层优化方法, 在 PVMFGCI 剩余容量较为充足的条件下建立 3 层优化方法, 提出了一种 PVMFGCI 无功和谐波优化方法, 并采用自适应蚁群算法求解优化方法的目标函数, 充分利用了 PVMFGCI 的剩余容量进行无功优化和谐波治理, 大幅度提高了其利用率以及电网的经济效益。基于算例仿真结果可得如下结论。

1) 在 PVMFGCI 的不同出力状态下, 基于自适应蚁群算法的 PVMFGCI 无功和谐波优化方法可以较好地优化电网电能质量, 且不影响 PV 并网输出功率, 无需额外安装 APF 就能使电能质量达标, 提高了 PV 并网运行的经济性。

2) 在 PVMFGCI 剩余容量较为不足的条件下, 所提改进的双层优化方法可使部分超标节点的谐波畸变率和功率因数达标, 满足并网要求; 在 PVMFGCI 剩余容量充足的条件下, 所提 3 层优化模型可使节点电能质量最优。

3) 对比自适应蚁群算法、鱼群算法与改进遗传

算法的收敛特性可知,自适应蚁群算法得到的目标函数适应值最大,且具有更快的收敛速度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 金艳梅,江华,强彦政,等. 中国光伏产业2020年回顾与2021年展望[J]. 太阳能,2021(4):42-50.
JIN Yanmei,JIANG Hua,QIANG Yanzheng,et al. Review of China's PV industry in 2020 and prospect in 2021[J]. Solar Energy,2021(4):42-50.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LÜ Zhipeng,et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [3] ZENG Z,ZHAO R X,YANG H. Coordinated control of multi-functional grid-tied inverters using conductance and susceptance limitation[J]. IET Power Electronics,2014,7(7):1821-1831.
- [4] 曾正,赵荣祥,杨欢,等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术,2012,36(5):58-67.
ZENG Zheng,ZHAO Rongxiang,YANG Huan,et al. A multi-functional grid-connected inverter and its application to customized power quality of microgrid[J]. Power System Technology,2012,36(5):58-67.
- [5] 孙浩,姚鹏,张磊,等. 计及有功-无功功率协调控制的2层微电网优化调度模型[J]. 高电压技术,2015,41(10):3249-3255.
SUN Hao,YAO Peng,ZHANG Lei,et al. Bi-level microgrid optimal dispatching model considering active-reactive power coordinated control[J]. High Voltage Engineering,2015,41(10):3249-3255.
- [6] 马丽,薛飞,石季英,等. 有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):86-93.
MA Li,XUE Fei,SHI Jiying,et al. Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):86-93.
- [7] 魏凯. 微电网中多功能并网逆变器电能质量治理策略研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019.
WEI Kai. Research on power quality control strategy of multi-function grid-connected inverter in microgrid[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2019.
- [8] ALGADDAFI A,ALTUWAYJIRI S A,AHMED O A,et al. An optimal current controller design for a grid connected inverter to improve power quality and test commercial PV inverters[J]. The Scientific World Journal,2017,2017:1393476.
- [9] BOJOI R I,LIMONGI L R,ROIU D,et al. Enhanced power quality control strategy for single-phase inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):798-806.
- [10] 刘宏达,周磊. 多功能并网逆变器及其在接入配电系统的微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2649-2658.
LIU Hongda,ZHOU Lei. A multi-functional grid-connected inverter and its application in micro-grid access to distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2649-2658.
- [11] SAFA A,BERKOUK E M,MESSLEM Y,et al. An improved sliding mode controller for a multifunctional photovoltaic grid tied inverter[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy,2017,9(6):323-329.
- [12] PREETHA K P,JAYANAND B,REJI P. Power quality enhancement using distributed generation inverters with active power control[C]//2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy. Kollam, India: IEEE,2015:205-210.
- [13] DONG H N,YUAN S,HAN Z J,et al. A comprehensive strategy for power quality improvement of multi-inverter-based microgrid with mixed loads[J]. IEEE Access,2018,6:30903-30916.
- [14] 马明,廖鹏,蔡雨希,等. LCL并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):174-182.
MA Ming,LIAO Peng,CAI Yuxi,et al. First-order active disturbance rejection control and parameter tuning method based on particle swarm optimization for LCL grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):174-182.
- [15] 孙广宇,李永丽,靳伟,等. 基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J]. 电网技术,2019,43(4):1211-1221.
SUN Guangyu,LI Yongli,JIN Wei,et al. A comprehensive power quality control strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverters[J]. Power System Technology,2019,43(4):1211-1221.
- [16] 郑峰,林祥群,邓长虹,等. 计及降阶混合控制算法多逆变器并联系统谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):48-55.
ZHENG Feng,LIN Xiangqun,DENG Changhong,et al. Resonance suppression strategy of multi-inverter parallel system considering hybrid control algorithm for order reduction[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4):48-55.
- [17] KOOHI-KAMALI S,RAHIM N A,MOKHLIS H. Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load[J]. Energy Conversion and Management,2014,84:562-582.
- [18] MANNEN T,FUJITA H. Dynamic control and analysis of DC-capacitor voltage fluctuations in three-phase active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(9):6710-6718.
- [19] 周子轩,王果,王久琰. 不同电流检测方法对并网逆变器用于电能质量治理的比较分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(1):169-175.
ZHOU Zixuan,WANG Guo,WANG Jiuhui. Comparative analysis of different current detection methods for power quality control of grid-connected inverters[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(1):169-175.
- [20] 吴鸣,吕振宇,宋振浩,等. 独立型虚拟同步化微电网分布式无功-电压二级控制策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):63-71.
WU Ming,LÜ Zhenyu,SONG Zhenhao,et al. Distributed reactive power-voltage secondary control strategy of independent virtual synchronization technology-based microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(8):63-71.

作者简介:

王 果(1977—),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为牵引供电系统电能质量分析与控制、电力电子技术及其应用、微电网控制及杂散电流分析(E-mail: wangguo2005@eyou.com);

武 旭(1993—),男,硕士研究生,研究方向为光伏发电系统逆变器控制与优化(E-mail: wuxu199302@163.com)。

(编辑 陆丹)

Optimization method of reactive power and harmonic for photovoltaic multi-function grid-connected inverter under different output states

WANG Guo¹, WU Xu¹, LI Long², ZHANG Mengyuan¹, LI Xuzhe^{1,3}, CHENG Ke^{1,3}, ZHANG Jianxiong¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Qingdao Dingxin Communication Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the active advantages of photovoltaic multi-function grid-connected inverter (PVMFGCI) in power quality control and harmonic resonance suppression, and combined with the output characteristics of photovoltaic power generation system under different output states of the inverter, the optimization method of reactive power and harmonic for PVMFGCI under different output states is proposed. In the proposed three-layer optimization strategy, the upper-layer optimization strategy takes the maximum grid-connected active power as the objective function, the middle-layer optimization strategy takes the total harmonic distortion rate and voltage deviation to reach the specified targets of corresponding power quality as the objective function, and the lower-layer optimization strategy takes the minimum harmonic distortion rate and voltage deviation as the objective function, which is solved by the adaptive ant colony algorithm. Taking the IEEE 33-bus system as the example, the results show that the optimization method based on different output states of the inverter can effectively improve the power quality of power grid and improve the economy of power grid operation. On the basis of stable operation of the system, the PVMFGCI can stage control harmonics and adjust voltage deviation by primary and secondary under different output states, and its control effect is better.

Key words: photovoltaic power generation system; multi-function grid-connected inverter; optimization strategy; reactive power optimization; harmonic governance

(上接第63页 continued from page 63)

High frequency isolated hybrid distribution transformer based on model predictive control

WANG Xiuyun, GAO Shuo, PEI Zhongchen, LIU Chuang, LI Ruifeng, YANG Weiping

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The proportion of new source/load in the distribution area is increasing year by year, which makes the power quality problems of the distribution terminal, such as high/low voltage, harmonic amplification and three-phase imbalance, become prominent. A high frequency isolated hybrid distribution transformer based on model predictive control is proposed, which has the functions of comprehensive power quality management, AC/DC hybrid distribution, etc., and can meet the requirements of high-quality power supply and new source/load friendly access of distribution terminal users. The topology of high frequency isolated hybrid distribution transformer is introduced and the mathematical model is deduced. Combined with the characteristics of the topology, a continuous control set model predictive control (CCS-MPC) strategy and a delay model predictive control strategy are designed. By calculating the optimal duty cycle, CCS-MPC realizes that the output of the front-end converter has a fixed switching frequency and switching sequence, which reduces the amount of optimization calculation. A set of high-frequency isolated hybrid distribution transformer system with the voltage level of 10 kV/0.4 kV is built by using MATLAB/Simulink simulation software, which verifies the effectiveness of the comprehensive power quality management capability of the proposed topology.

Key words: distribution area; high frequency isolated hybrid distribution transformer; model predictive control; optimal duty cycle; comprehensive power quality management

附录 A

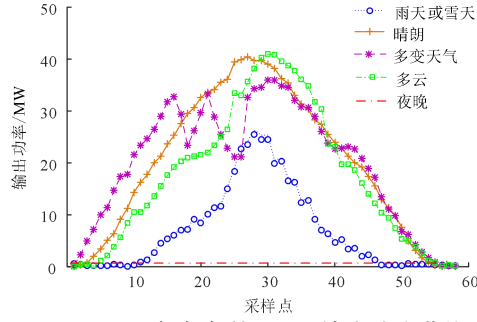


图 A1 不同气象条件下 PV 输出功率曲线

Fig.A1 PV output power curves under different meteorological conditions

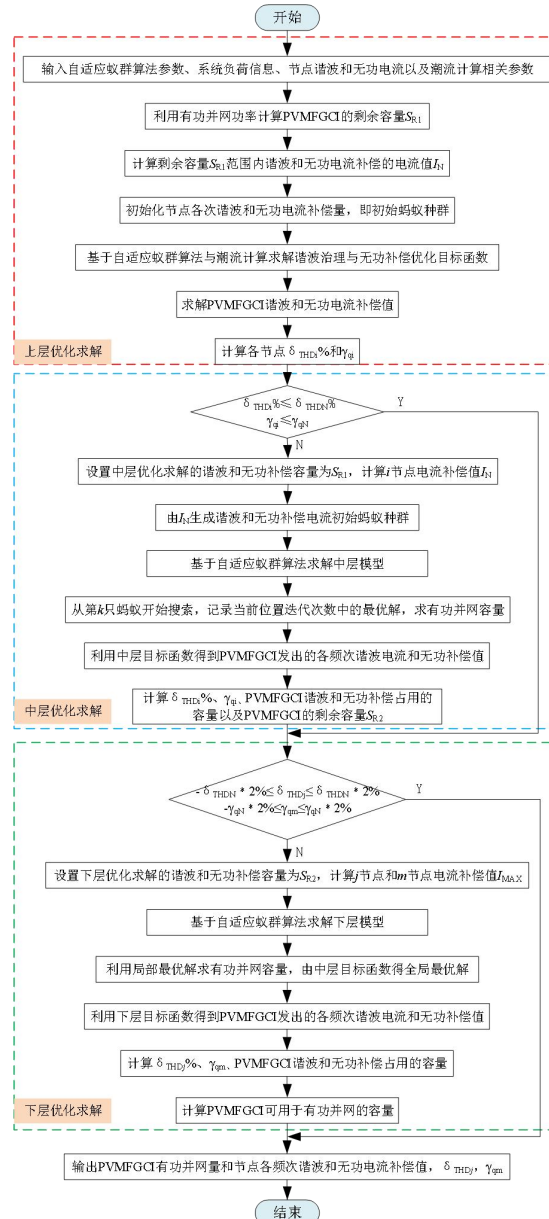


图 A2 3 层优化方法的求解流程图

Fig.A2 Flowchart of solving three-level optimization method

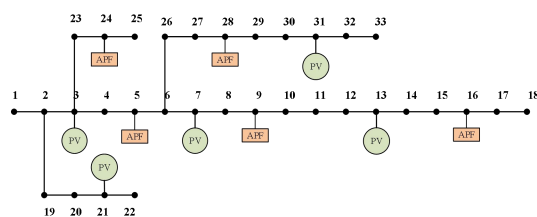


图 A3 IEEE 33 节点系统 PV、APF 接入图

Fig.A3 IEEE 33 node system PV and APF access diagram

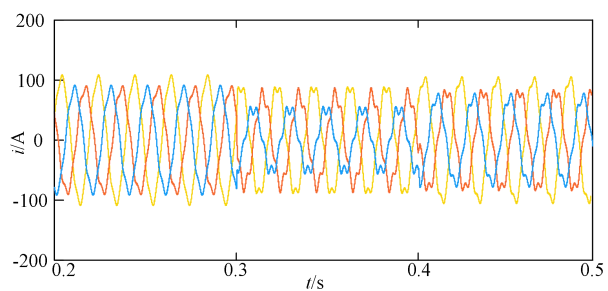


图 A4 治理前的电网电流波形

Fig.A4 Power grid current waveform before governance

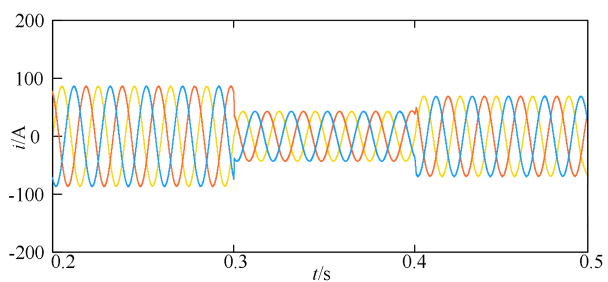


图 A5 治理后的电网电流波形

Fig.A5 Power grid current waveform after governance

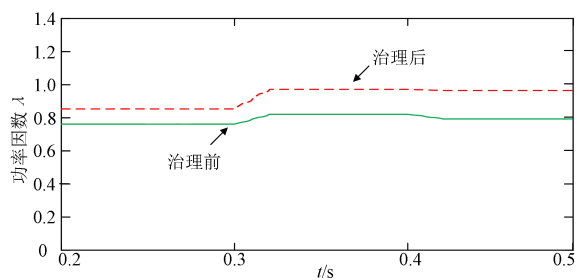


图 A6 治理前、后的功率因数曲线

Fig.A6 Power factor curves before and after governance

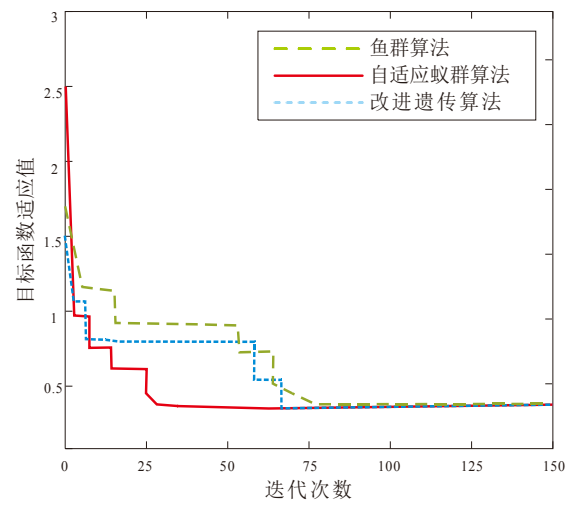


图 A7 收敛特性曲线

Fig.A7 Convergence characteristic curves