

# 含分布式电源的配电网功率优化模式 影响因素分析

季玉琦<sup>1</sup>, 王 涛<sup>1</sup>, 史少彧<sup>2</sup>, 金 楠<sup>1</sup>, 杨存祥<sup>1</sup>, 和 萍<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

**摘 要:** 大规模分布式电源并网丰富了配电网的调控手段。针对分布式电源接入后的配电网功率优化问题, 本文对有功无功解耦优化和二者协调优化这 2 种功率优化模式的关键影响因素进行研究, 提出一种考虑源、网、荷变化的配电网功率优化影响因素分析方法。首先基于 2 种功率优化模式的数学模型, 分析上网电价、网络参数、负荷等因素与功率优化模型的交互作用机理; 然后给出线路阻抗比、负荷功率因数对线路传输功率的数学表达, 定性地给出 2 种优化模式的边界条件; 最后以改进的 IEEE-33 节点系统为例进行仿真, 验证上网电价、线路阻抗比、线路长度、负荷功率因数、负荷大小等因素对 2 种功率优化模式的总发电成本和计算时间的影响。

**关 键 词:** 分布式电源; 功率优化; 上网电价; 阻抗比; 功率因数

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.011 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2020)00-0097-11

## Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations

JI Yuqi<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, SHI Shaoyu<sup>2</sup>, JIN Nan<sup>1</sup>, YANG Cunxiang<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1</sup>

(1. School of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Sanmenxia Power Supply Company, State Grid Henan Power Corporation, Sanmenxia 472000, China)

**Abstract:** With the grid connection of large scale distributed generations, the regulation and control of distribution network becomes more diversified. Under the circumstance, the key influence factors of the decoupling optimization and coordinated optimization of active and reactive power is investigated. Firstly, an analysis method considering the influence of the changing of power source, network, and load on the power optimization of distribution network is proposed for problem of the power optimization for distribution network containing distributed generation. Then, based on the two power optimization models, the interaction mechanisms between power optimization and grid price, network parameters and load are analyzed. And the mathematical expressions of line impedance ratio and load power factor to transmission power are given. In addition, the boundary conditions of two optimization modes are given qualitatively. At last, an improved IEEE-33 bus system is included to verify the impact of core influence factors for two power optimization modes on the total power generation cost and calculation time, including the feed-in tariff, the impedance rate and length of transmission line, the power factors and load.

**Key words:** distributed generation; power optimization; feed-in tariff; impedance rate; power factor

近年来,以风电(wind turbine, WT)、光伏(photo-voltaic, PV)等为代表的分布式发电(distributed generation, DG)技术快速发展,电网对配电网调度运行提出更高的要求。电力系统在保证供电安全、

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2020-11-30

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目(52171020000G); 郑州轻工业大学博士基金(2018BSJJ008)

通信作者: 杨存祥(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新能源并网控制、特种电机优化设计与控制等研究; E-mail: motormag@163.com

稳定、可靠和经济的基础上,需要通过更加灵活高效的协调控制,提升清洁能源的消纳能力<sup>[1]</sup>。

电力系统最优潮流是实现系统优化运行的重要手段,通常分为有功优化和无功优化。有功优化多以发电成本或能耗最低为目标<sup>[2]</sup>,无功优化多以有功网损最低、无功补偿设备费用最小等为目标<sup>[3]</sup>。传统的最优潮流将有功优化和无功优化分开进行,这是因为高压输电网的电抗 $X$ 远大于电阻 $R$ ,有功功率与无功功率呈现弱耦合性<sup>[4]</sup>;而传统配电网是无源网,一般只需考虑无功优化。但是随着DG的大规模接入,配电网转变为有源网络,并且DG多是通过电力电子变换器并网,有功功率和无功功率受容量限制而相互制约<sup>[5]</sup>。同时,DG接入增加了配电网运行的不确定性,现有研究通常以确定性优化为基础,结合蒙特卡洛、随机约束规划等数学方法,建立随机优化模型<sup>[6]</sup>。

传统的有功无功解耦优化在计算速度和收敛性上有较大优势,但是存在以下问题<sup>[7]</sup>:有功无功同时受到发电机 $P$ - $Q$ 极限曲线的约束,有功出力的变化直接影响无功功率的可调范围,进而影响优化结果的准确性;配电网中 $X$ 与 $R$ 的比值有所减小,有功与无功功率之间耦合性较强<sup>[8]</sup>,此时有功无功解耦优化不能保证优化结果的正确性;无功优化可以降低有功网损,反过来对有功优化的计算结果有一定的影响。因此,从系统安全与经济性角度来看,也不能将有功优化与无功优化完全割裂。

基于上述问题,现有文献针对配电网有功无功协调优化的数学模型与方法进行了研究。文献[9]提出一种主动配电网多时间尺度有功无功协调调度方法,通过模型预测控制减少可再生能源间歇性以及负荷预测误差对主动配电网运行的影响;文献[10]提出一种基于有功无功协调优化的配电网电压控制模型,在考虑电容器组与分布式电源无功出力的基础上,引入储能装置并利用其充放电特性对电压偏差指标进行优化;文献[11]提出一种有功无功协调优化的混合整数二阶锥规划模型,将多目标非线性问题转变为线性规划的主问题和仅含连续变量的子问题迭代求解;文献[12]提出一种考虑电压约束的微电网有功无功联合优化调度方法,通过风电、光伏出力的多场景建模和模型预测控制,实

现了微电网的滚动实时优化调度与电压控制。

以上研究通过建立有功无功协调模型来实现降低网损、提升电压质量、消纳可再生能源等优化目标,但是并没有明确给出有功无功协调优化与传统有功无功解耦优化这2种优化模式的边界条件,缺乏对这2种优化模式的关键影响因素分析,即在某一特定场景下采用有功无功协调优化更好还是采用解耦优化更好。

针对上述问题,本文首先建立含DG的配电网有功无功解耦优化与二者协调优化的数学模型;然后从配电网的源、网、荷3个角度分析上网电价、网络参数、功率因数等因素与功率优化模型的交互作用机理;最后以优化效果和计算时间为标准,采用改进的IEEE-33节点算例进行验证。

## 1 含DG配电网功率优化的数学模型

### 1.1 有功优化的数学模型

配电网有功优化又称有功调度,一般以系统中各机组的有功出力为控制变量,以系统总发电成本最小为目标函数,通常采用二次型成本函数计算,即

$$f = \sum_x^N (a_x P_{G_x}^2 + b_x P_{G_x} + c_x) \quad (1)$$

式中, $N$ 为发电机节点的个数; $P_{G_x}$ 为发电机 $x$ 的有功出力; $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 为发电机 $x$ 的经济参数。

在中低压配电网中,常规发电机组较少,有功需求主要是从主网统一购电,因此本文对式(1)做简化处理,直接上网电价与各发电设备有功出力乘积作为成本函数,具体的数学模型为

$$f_1 = \sum_a^{N_g} k_a P_{G_a} = k_s P_s + \sum_i^{N_G} k_{G_i} P_{G_i} + \sum_j^{N_{DG}} k_{DG_j} P_{DG_j} \quad (2)$$

式中, $N_g$ 为有功电源的个数; $k_a$ 、 $P_a$ 分别为第 $a$ 个有功电源的上网电价和有功出力; $k_s$ 、 $P_s$ 分别为从主网购电部分的上网电价和有功功率; $N_G$ 、 $N_{DG}$ 分别为传统发电机组和分布式发电机组的节点个数; $k_{G_i}$ 、 $P_{G_i}$ 分别为第 $i$ 个传统发电机组的上网电价和有功出力; $k_{DG_j}$ 、 $P_{DG_j}$ 分别为第 $j$ 个分布式发电机组的上网电价和有功出力。

约束条件包含等式约束和不等式约束,一般在

进行有功优化时,不考虑无功约束。

等式约束主要是有功功率潮流平衡约束,即

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \cos \delta_{ij} = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

式中, $P_i$ 为节点*i*的有功注入功率, $i=1,2,\dots,N$ ;  $N$ 为系统节点个数; $V_i$ 、 $V_j$ 分别为节点*i*、*j*的电压; $Y_{ij}$ 、 $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点*i*和节点*j*之间的互导纳、互电导和互电纳; $\delta_{ij}$ 为 $V_i$ 与 $V_j$ 之间的相角差。

不等式约束主要有控制变量的调节范围约束和系统的安全运行约束,即

$$\begin{cases} V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ I_l \leq I_{l\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $V_{i\min}$ 、 $V_{i\max}$ 分别为节点*i*电压的上下限; $I_{l\max}$ 为线路*l*允许流过的最大电流。

## 1.2 无功优化的数学模型

配电网无功优化一般以系统中电容器投切容量、变压器分接头档位等为控制变量,最大限度降低系统损耗,提高系统的电压稳定性,改善电压质量,确保电力系统安全、稳定、经济运行。DG接入后还要考虑部分DG的电压无功调节能力。无功优化通常以有功网损最小为目标函数,即

$$f_2 = P_{\text{Loss}} = \sum_a^{N_g} P_{G_a} - P_D = P_s + \sum_i^{N_g} P_{G_i} + \sum_j^{N_{DG}} P_{DG_j} - P_D \quad (5)$$

式中, $P_D$ 为总有功负荷。

无功优化时不考虑有功约束,各发电机组有功出力均按照有功调度结果设置,约束条件如下。

无功功率潮流平衡约束为

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_{ci_c} = K_{ci_c} q_{ci_c} \\ T_{i_r} = 1 + K_{T_{i_r}} \Delta T_{i_r} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $Q_i$ 为节点*i*的无功注入功率, $i=1,2,\dots,N$ ;  $Q_{ci_c}$ 为电容器组无功出力; $q_{ci_c}$ 为第*i<sub>c</sub>*个电容器组的单组容量; $K_{ci_c}$ 为投入组数; $T_{i_r}$ 为第*i<sub>r</sub>*个变压器分接头档位; $K_{T_{i_r}}$ 为分接头位置; $\Delta T_{i_r}$ 为分接头最小调节量。对于调节范围 $1 \pm 3 \times 2.5\%$ 的变压器, $K_{T_{i_r}}$ 有 $-3, -2, \dots, 3$ 等7个取值, $\Delta T_{i_r} = 2.5\%$ 。

除等式约束外,还需要满足如下不等式约束:

$$\begin{cases} Q_{G_i, \min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i, \max} \\ Q_{DG_j, \min} \leq Q_{DG_j} \leq Q_{DG_j, \max} \\ V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ I_l \leq I_{l\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Q_{G_i, \max}$ 、 $Q_{G_i, \min}$ 分别为第*i*个传统发电机组无功出力上、下限; $Q_{DG_j, \max}$ 、 $Q_{DG_j, \min}$ 分别为第*j*个分布式发电机组DG<sub>*j*</sub>无功出力的上、下限。

## 1.3 有功无功协调优化的数学模型

有功无功协调优化通常以各有功源的有功出力和各无功源的电压无功出力为控制变量,对系统运行的经济性与安全性进行优化,其数学模型本质上是对有功优化和无功优化的数学模型进行整合。

为选取有功无功协调优化的目标函数,文献[13]通过理论推导得出:以系统总发电成本最小为目标,与以系统有功网损最小为目标的优化结果是等价的。故本文以式(2)系统总发电成本最小作为有功无功协调优化的目标函数。

约束条件为有功优化与无功优化约束条件的整合。此时需特别注意,发电机组有功出力与无功出力应受机组*P-Q*极限曲线的约束,通过电力电子变换器并网的机组有功出力和无功出力应受并网变换器容量的约束。

### 1) 传统发电机的*P-Q*极限曲线约束。

传统发电机组的*P-Q*极限曲线约束主要受到静态稳定、定子电流、励磁绕组温升、发电机机械功率等约束的影响。

静态稳定极限约束为

$$Q_G \geq \frac{P_G}{\tan \delta_{\max}} - \frac{U_G^2}{x_d} \quad (9)$$

定子最大电流约束为

$$Q_G^2 \leq (U_G I_{\max})^2 - P_G^2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} I_{\max} = \frac{1}{U_{G\min}} \sqrt{Q_{G\max}^2 + P_{G\max}^2} \\ E_{q\max} = \frac{1}{U_{G\min}} \sqrt{(Q_{G\max} + \frac{U_{G\max}^2}{x_d})^2 + P_{G\max}^2} \end{cases} \quad (11)$$

励磁绕组温升约束为

$$Q_G \leq -\frac{U_G^2}{x_d} + \sqrt{\frac{E_{q\max}^2 U_G^2}{x_d^2} - P_G^2} \quad (12)$$

发电机有功约束为

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (13)$$

式(9)~(13)中,  $\delta_{max}$ 为机端电压与交轴的夹角最大值;  $U_G$ 为机端电压;  $x_d$ 为直轴电抗;  $E_{qmax}$ 为最大空载电势;  $I_{amax}$ 为定子电流最大值;  $Q_{Gmax}$ 为发电机最大无功;  $P_{Gmax}$ 、 $P_{Gmin}$ 分别为发电机有功上、下限。

2) DG的P-Q约束。

通过电力电子变换器并网的DG应满足约束:

$$P_{DG}^2 + Q_{DG}^2 \leq S_{DG}^2 \quad (14)$$

式中,  $P_{DG}$ 为DG有功出力;  $Q_{DG}$ 为DG无功出力;  $S_{DG}$ 为DG额定容量。

#### 1.4 2种优化模式性能对比

为对比2种优化模式的计算性能,以如图1所示某实际配电网为例进行仿真验证,其中高压配电网参数来自某地实际66 kV电网,电源端包括平衡节点(与220 kV大电网相连)、一个小型火电厂  $G_1$  和一个风电场  $G_2$ ,负荷端连接3个66/10 kV降压变电站,每个变电站配有无功补偿电容器组。

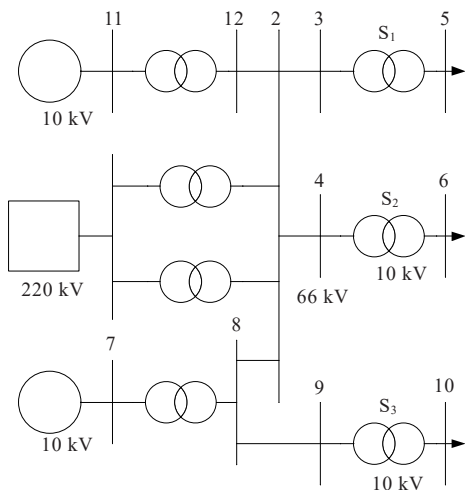


图1 某配电网的接线

Figure 1 Connection diagram of a distribution network

图1中,3个降压变电站  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 的10 kV母线分别下接了若干条中压线路,中压线路参照某地实际线路参数和标准算例参数建立,各条中压线路均配有电容器组和DG,具体信息如表1所示。

2种优化模式的计算时间和优化结果随控制变量个数的变化如表2所示。仿真计算机的配置为Intel i7四核2.8 GHz CPU,内存16 G,仿真环境为Matlab R2011b。

表1 算例中10 kV线路信息

Table 1 Information of 10 kV lines

变电站	变电站容量/ (MV·A)	下接10 kV 线路条数	节点 个数	无功控制 设备个数
$S_1$	20.00	4	199	22
$S_2$	20.00	3	152	23
$S_3$	3.15	2	81	11

表2 2种优化模式计算结果

Table 2 Calculation results of two optimization modes

控制 变量 个数	计算时间/s				发电成本/( $10^3$ 元/h)	
	有功无 功协调 优化	解耦优化			有功无 功协调 优化	有功无 功解耦 优化
		有功	无功	总计		
10	5.17	1.08	1.90	2.98	1.844	1.848
18	24.37	2.11	3.21	5.32	1.861	1.867
29	44.47	2.43	7.88	10.31	2.375	2.384
37	72.81	2.43	9.54	11.97	3.301	3.318
71	216.38	9.87	37.73	47.60	7.006	7.114
87	—	9.93	45.75	55.68	—	7.126

由表2可知,随着控制变量增多,2种优化模式的计算时间皆增大,且协调优化所需时间大于解耦优化,但协调优化的目标函数(发电成本)相对较小。当控制变量个数增至71时,协调优化的计算时间大幅增加;当控制变量个数增至87时,协调优化计算不收敛。说明协调优化的计算结果通常优于解耦优化,但计算速度和收敛性不如后者。

上述内容分析了控制变量个数对2种优化模式的计算速度和优化结果的影响,下面将从源、网、荷3个角度来分析新能源上网电价、网络参数和功率因数等因素对2种优化模式优化性能的影响。

## 2 上网电价、网络参数、功率因数与功率优化的交互作用机理分析

配电网的功率优化是一个最优潮流问题,发电机组的上网电价<sup>[14]</sup>、线路的阻抗比、功率因数等对有功功率与无功功率之间的耦合关系有较大影响。若有功功率与无功功率强耦合,则二者协调优化效果更好;若二者弱耦合,甚至无耦合关系(如直流配电网),则解耦优化的效果更好。

### 2.1 各新能源发电市场定价

根据国家能源局 2019 年底发布的《2018 年度全国电力价格情况监管通报》,2018 年全国发电企业平均上网电价为 373.87 元/(MW·h)。不同地区的燃煤、水电、风机、光伏和燃气机组的发电成本不同,上网电价也各不相同。2018 年常见的传统发电机组与新能源发电机组的平均上网电价如表 3 所示,可知水力发电成本相对较低,而风机、光伏发电成本平均高于燃煤机组。以光伏发电为例,2018 年重点省市光伏发电上网电价如表 4 所示,可知 5 个代表省市光伏发电上网电价都高于传统发电上网电价。

表 3 2018 年常见发电机组的平均上网电价

Table 3 Average feed-in tariff of common generator set in 2018

机组	平均上网电价/(元/(MW·h))	
	全国	重点省份
燃煤	370.52	387.56
水电	267.19	258.58
风机	529.01	529.34
光伏	859.79	890.38
燃气	584.10	—

表 4 2018 年 5 个代表省份光伏发电上网电价

Table 4 Feed-in tariff of photovoltaic power generation in five representative provinces in 2018 元/(MW·h)

省市	光伏上网电价	省市	光伏上网电价
重庆	396.40	青海	900.13
海南	442.65	江苏	1 113.42
宁夏	832.37		

以总发电成本最小为目标进行优化,当负荷增加时,通常是电价较低的机组优先增加出力,因此,上网电价是影响功率优化结果的一个重要因素。

### 2.2 网络参数与功率优化的交互作用机理分析

一个典型的辐射状配电网络如图 2 所示,变压器高压侧接上级电网,低压侧接各用户支路。该系统共有  $n$  个节点,其中第  $i$  个节点的有功负荷和功率因数分别为  $P_i$  和  $\cos \varphi_i$ 。

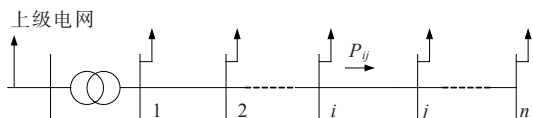


图 2 某典型辐射状配电网络

Figure 2 A typical radial distribution network

对于线路  $l_{ij}$ ,若忽略其并联导纳,则功率平衡方程<sup>[15]</sup>可简化为

$$P_{ij} = \frac{(V_i^2 - V_i V_j \cos \delta_{ij}) R_{ij} + (V_i V_j \sin \delta_{ij}) X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \tag{15}$$

$$Q_{ij} = \frac{-(V_i V_j \sin \delta_{ij}) R_{ij} + (V_i^2 - V_i V_j \cos \delta_{ij}) X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \tag{16}$$

式(15)、(16)中, $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 分别为线路  $l_{ij}$ 的有功和无功功率。

将式(15)、(16)联立,即

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j \sin \delta_{ij} + R_{ij} Q_{ij}}{X_{ij}} = \frac{V_i V_j \sin \delta_{ij}}{X_{ij}} + \alpha_{ij} Q_{ij} \tag{17}$$

式中, $\alpha_{ij}$ 为线路  $l_{ij}$ 的电阻与电抗的比值。

根据式(17), $X_{ij}$ 相对  $R_{ij}$ 越大, $\alpha_{ij}$ 越小, $P_{ij}$ 与  $Q_{ij}$ 耦合性越弱。当  $X_{ij} \gg R_{ij}$ 时,对式(17)做如下简化: $V_i = V_j = 1, \sin \delta_{ij} = \delta_{ij}$ 。则其可进一步写为

$$P_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{X_{ij}} + \alpha_{ij} Q_{ij} \tag{18}$$

由式(18)可知,若保持线路电抗不变,通过改变电阻来改变阻抗比,在线路无功不变的情况下,线路有功随阻抗比增大而增大。以架空线为例,线路阻抗随横截面积(横截面积是根据架空导线的相关学术标准与电气设备手册确定)的变化曲线<sup>[16]</sup>如图 3 所示。由图 3 可知,随着架空线横截面积的增大,线路电阻和阻抗比下降趋势明显,而线路电抗变化较小。

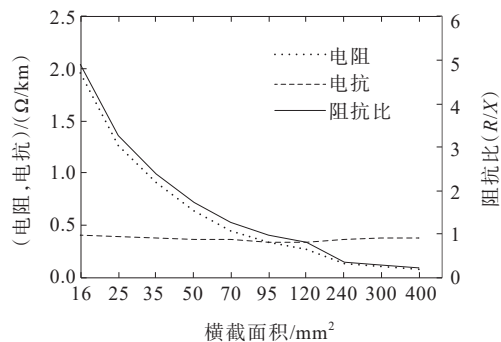


图 3 不同截面积架空线阻抗比

Figure 3 Impedance ratio of overhead line with different cross section

为了测试线路阻抗比的大小对功率分布的影响,以IEEE-33节点系统支路阻抗比为基准值1,等比例放大或缩小其电阻,支路14上的功率随阻抗比变化如图4所示,其中横坐标为线路阻抗比相对基准值增大或减小的倍数。

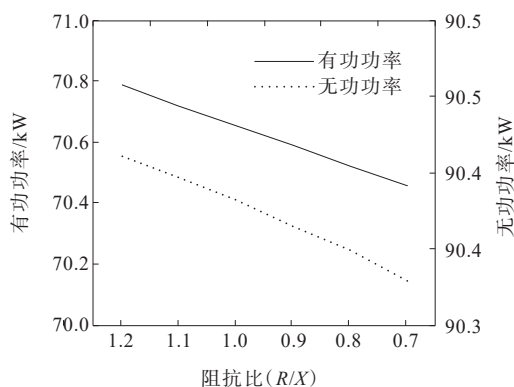


图4 支路功率随阻抗比的变化趋势

Figure 4 Variation trend of branch power with the impedance rate( $R/X$ )

由图4可知,随着阻抗比的减小,线路传输的有功和无功都减少,同时二者间的耦合度降低。若保持线路阻抗比不变,等比例增大或减小 $X_{ij}$ 和 $R_{ij}$ ,此时即改变线路长度。根据式(17),在线路无功不变的情况下, $P_{ij}$ 会随分式项 $(V_i V_j \sin \delta_{ij})/X_{ij}$ 变化,同时影响线路损耗,进而改变系统潮流分布。

### 2.3 功率因数与功率优化的交互作用机理分析

对于线路 $l_{ij}$ ,其流过的有功功率为

$$P_{ij} = P_j + \dots + P_n + \Delta P_{ij} + \dots + \Delta P_{n-1,n} \quad (19)$$

式中, $\Delta P_{ij}, \dots, \Delta P_{n-1,n}$ 依次为线路 $l_{ij}, \dots, l_{n-1,n}$ 的有功网损。

线路 $l_{ij}$ 上的视在功率和功率因数 $\cos \varphi_{ij}$ 分别为

$$S_{ij} = \frac{P_j}{\cos \varphi_j} + \dots + \frac{P_n}{\cos \varphi_n} + \Delta S_{ij} + \dots + \Delta S_{n-1,n} \quad (20)$$

$$\cos \varphi_{ij} = \frac{P_{ij}}{S_{ij}} = \frac{\sum P + \sum \Delta P}{\sum \frac{P}{\cos \varphi} + \sum \Delta S} \quad (21)$$

$$\frac{Q_{ij}}{P_{ij}} = \tan \left[ \arccos \left( \frac{\sum P + \sum \Delta P}{\sum \frac{P}{\cos \varphi} + \sum \Delta S} \right) \right] \quad (22)$$

根据式(22)可知,节点有功负荷 $P$ 固定时, $\cos \varphi$ 越趋近于1, $Q_{ij}$ 越小,同时 $\Delta P, \Delta S$ 越小。因

此, $\cos \varphi$ 越大, $P_{ij}$ 和 $Q_{ij}$ 耦合性越弱。

以IEEE-33节点系统为例,通过改变各节点负荷的功率因数,测得各支路的有功功率和无功功率的变化趋势如图5所示。由图5可知,功率因数越趋近于1,线路有功无功越小。支路无功随有功变化趋势如图6所示。

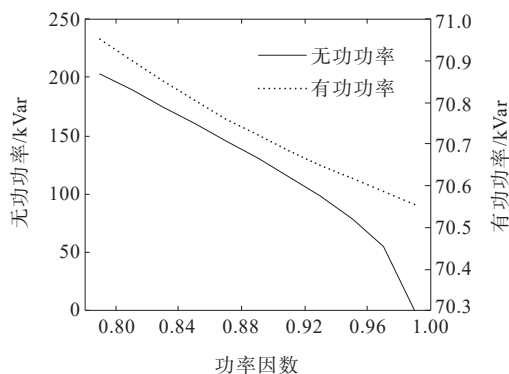


图5 支路功率随功率因数变化趋势

Figure 5 Variation trend of branch power with power factor

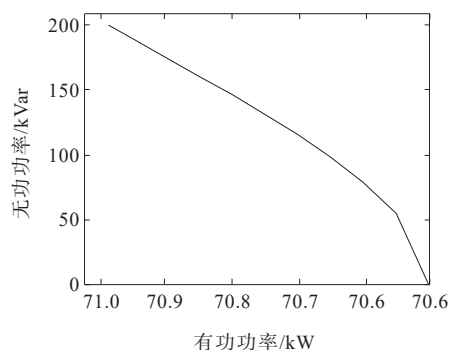


图6 支路无功随有功变化趋势

Figure 6 Variation trend of reactive power with active power

由图6可知,功率因数趋近于1时,无功随有功变化率增大,有功无功之间的耦合度变弱。由式(21)可知, $\cos \varphi$ 固定,同时增加节点有功和无功负荷, $\Delta \sum \frac{P}{\cos \varphi} \geq \Delta \sum P, \Delta \sum \Delta S > \Delta \sum \Delta P$ ,所以 $\Delta S_{ij} > \Delta P_{ij}$ , $\cos \varphi_{ij}$ 减小, $Q_{ij}$ 增大。因此,负荷越大, $P_{ij}$ 和 $Q_{ij}$ 耦合性越强。

### 2.4 序列二次规划法

本文中所有的优化算法均采用序列二次规划法(sequential quadratic programming, SQP)。SQP算法是一种求解含约束非线性规划问题的有效算法,其基本思想是:引入拉格朗日乘子,根据目标函数、等式约束与不等式约束构造拉格朗日函数,将原问题转化为一系列的二次规划子问题;通过二次

规划子问题的求解来确定搜索方向;通过一维搜索确定步长,重复迭代取得最优解<sup>[17]</sup>。具体的算法流程如图 7 所示。

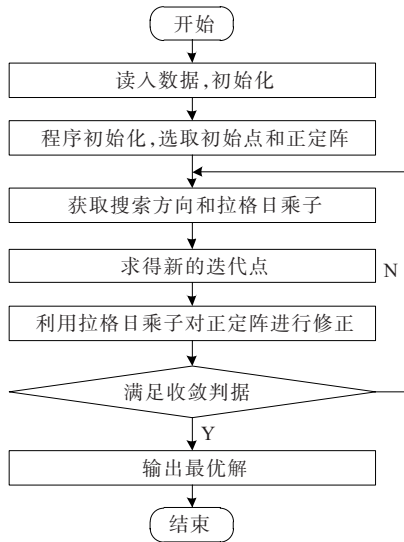


图 7 序列二次规划法流程  
Figure 7 Flow chart of SQP

### 3 算例分析

以改进的 IEEE-33 节点系统<sup>[18]</sup>为例对本文提出的方法进行验证。图 8 为改进后的 IEEE-33 节点系统接线图,系统包含 5 个 DG, 分别连接在节点 10、15、20、23、31 处,容量分别为 200、200、300、300、500 kV·A,其中节点 10 接 WT,节点 15、20、31 接 PV<sub>1</sub>、PV<sub>2</sub> 和 PV<sub>3</sub>,节点 23 接微型燃气轮机 MT。在节点 13、29 处分别并联补偿电容 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>,补偿容量均为 600 kvar。

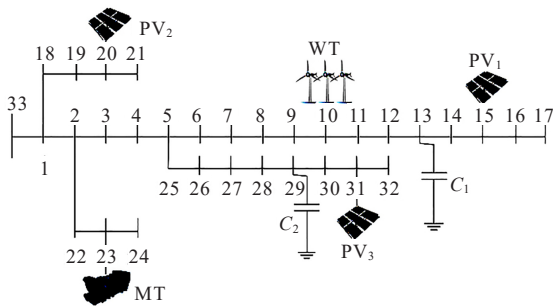


图 8 改进 IEEE-33 节点结构  
Figure 8 Improved IEEE-33 node structure

#### 3.1 上网电价对优化结果的影响分析

不同地区、不同类型的新能源发电成本各不相同,因此以常见新能源发电的全国平均上网电价作

为式(2)的  $k_{DG}$ 。此外,国家能源局发布的《2020 年能源工作指导意见》中提到保持风电、光伏发电合理规模和发展节奏,积极推进风电、光伏发电平价上网。为降低新能源上网电价与燃煤机组上网电价的差异对 2 种优化模式对比结果的影响<sup>[19]</sup>,根据国家发改委《关于完善陆上风电、光伏发电上网标杆电价政策的通知》文件规定,光伏、风力电站标杆上网电价等于当地燃煤机组标杆上网电价与国家可再生能源发展基金补贴之和,再把所有机组的上网电价统一设置为燃煤机组的标杆电价 370.52 元/(MW·h),对比补贴电价前、后 2 种优化模式的计算结果如表 5 所示。

表 5 去除新能源补贴前后的上网标杆电价下的功率优化计算结果

Table 5 Power optimization calculation results under the benchmark price before and after removing new energy subsidies

模式	总发电成本/(千元/h)	
	补贴前	补贴后
有功无功解耦优化	1.148 9	1.427 1
有功无功协调优化	1.088 8	1.410 2

由表 5 可知,补贴前后有功无功解耦优化的总发电成本均高于有功无功协调优化;不考虑其他因素的情况下,有功无功协调优化结果优于解耦优化。

通过 2 种优化模式的对比结果可以看出,上网电价不考虑国家补贴时,总发电成本比上网电价考虑国家补贴时较低,这是由于新能源发电成本通常高于燃煤机组,所以配电网优先从上层电网取电;以有功无功协调优化为例,上网电价补偿前后各 DG 有功出力及从上级电网吸收的有功如图 9 所示。

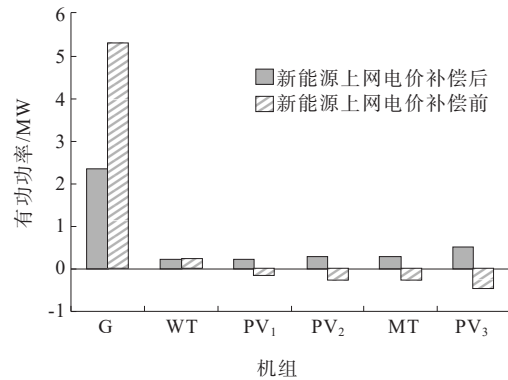


图 9 未补偿电价时各 DG 有功出力及从电网吸收的有功  
Figure 9 Active power output of each DG and active power absorbed from the grid in case of uncompensated electricity price

图9中,G表示IEEE-33节点系统与主网连接点。由图9可知,上网电价未考虑国家补贴时,系统从主网吸收大量有功,PV<sub>1</sub>~PV<sub>3</sub>不发出有功反从电网吸收有功;上网电价考虑国家补贴时,各DG正常发出有功,电网负担明显减少。因此,采用考虑国家补贴的上网电价,优化效果明显更好,同时不缺乏合理性,故后文在研究其他影响因素时,上网电价均设定为新能源补贴后的电价。

### 3.2 阻抗比对优化结果的影响分析

以IEEE-33节点系统支路阻抗比为基准值1,保持电抗不变,通过等比例增大或减小电阻的方式来改变阻抗比,有功无功解耦优化和二者协调优化的对比结果如图10所示。

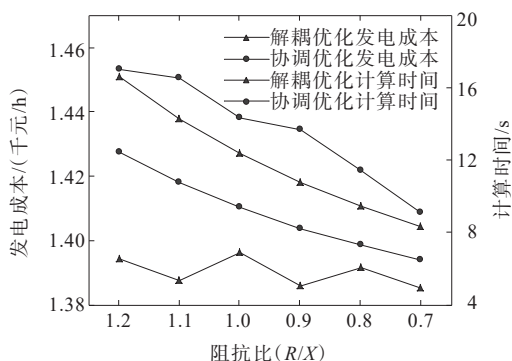


图10 不同阻抗比下2种优化模式的发电成本与计算时间  
Figure 10 Power generation cost and calculation time of two optimization modes with different the impedance rate(R/X)

由图10可知,阻抗比越小,系统发电成本越小,呈正相关,且每组协调优化的发电成本皆少于解耦优化。此外,随着阻抗比减小,2种功率优化模式间的发电成本误差由1.66%降为0.74%,说明线路阻抗比越大,有功无功协调优化的经济性越明显,这是因为随着阻抗比增大,有功无功的耦合性增强。但是,每组有功无功协调优化的计算时间都多于有功无功解耦优化,其中协调优化计算时间随阻抗比减小呈下降趋势,解耦优化计算时间基本稳定;随着阻抗比减小,2种功率优化模式间的计算时间误差由194%降为57%。

由图3可知, $R/X=1.2$ 对应截面积为 $70\text{ mm}^2$ 的架空线,通常最大传输功率为 $4\ 760\text{ kV}\cdot\text{A}$ ,此时有功无功协调优化的成本优势更明显,但计算时间较长,适用于计算精度要求较高但是计算实时性要求不高的场景。 $R/X=0.7$ 对应截面积为 $120\text{ mm}^2$ 的

架空线,最大传输功率为 $6\ 580\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。此时,2种模式优化效果相差较小,可采用有功无功解耦优化减少计算时间。

### 3.3 线路长度对优化结果的影响分析

为研究线路长度对功率优化的影响,以原系统线路长度为基准1,保持阻抗比不变,等比例增大或者减小线路阻抗,2种功率优化模式下的对比结果如图11所示。

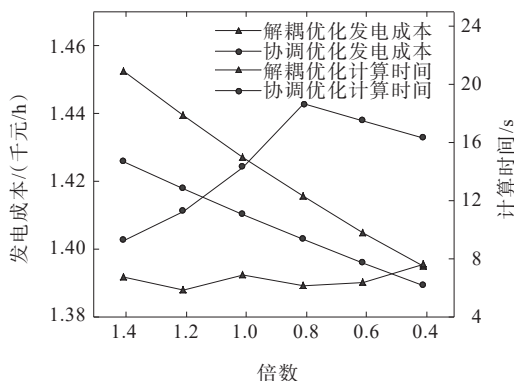


图11 不同线路长度下2种优化模式的发电成本与计算时间

Figure 11 Power generation cost and calculation time of two optimization modes with different line length

由图11可知,线路长度与系统优化目标呈正相关,有功无功协调优化结果优于解耦优化;随线路长度增大,2种功率优化模式间的发电成本误差由0.42%升为1.87%,说明线路越长,采用有功无功协调优化方式越节约成本。此外,有功无功解耦优化计算速度优于有功无功协调优化,其中协调优化计算时间随线路长度的减小先增多后减少,解耦优化计算时间基本稳定。

综上所述,对于中等以上长度线路且对计算实时性要求不高的场景,可采用协调优化模式,计算精度及优化效果更好;对于中等以下长度线路或计算实时性较高的场景,协调优化发电成本优势不够明显且计算时间较长,采用解耦优化效果更好。

### 3.4 功率因数对优化结果的影响分析

为研究功率因数对功率优化的影响,固定原系统各节点有功负荷不变,通过增大或减小无功负荷来改变功率因数,得出2种功率优化模式的对比结果如图12所示。

图12中,功率因数从0.8增加到1后又降低到0.94,无功负荷一直减小到0后,从无功负荷转为无功电源。功率因数越趋近于1,系统发电成本越小,



2种功率优化模式间的发电成本误差由 1.01% 降为 0.02%,因为此时有功无功耦合性较弱,且每组协调优化发电成本皆少于解耦优化。因此,功率因数与功率优化目标呈正相关,功率因数相同时,有功无功协调优化结果优于有功无功解耦优化。在可调范围内,负荷功率因数越小于 1,采用有功无功协调优化方式经济性越明显。

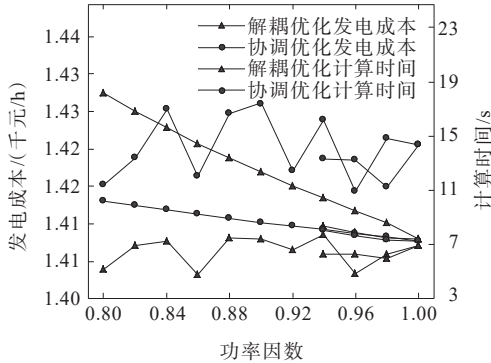


图 12 不同功率因数下 2 种优化模式的发电成本与计算时间

Figure 12 Power generation cost and calculation time of two optimization modes with different power factor

对比 2 种优化模式的计算时间,有功无功协调优化的计算时间大于有功无功解耦优化,随着功率因数的变化,2 种优化模式的计算时间曲线基本以相同趋势变化,呈震荡状态。在功率因数 0.80~1.00 段,功率因数每上升 0.04~0.06,计算时间曲线呈现出一个震荡周期,且功率因数越趋近于 1,振荡周期越短。

### 3.5 负荷大小对优化结果的影响分析

为了研究节点负荷大小对功率优化的影响,以原系统负荷为基准 1,固定各节点功率因数不变,等比例增大或减小有功无功负荷,考虑输电线路负载能力,设定负荷变化比例在 0.7~1.3 倍,2 种优化模式的对比结果如图 13 所示。

由图 13 可知,负荷与功率优化目标呈正相关;同一负荷水平下,协调优化效果优于解耦优化,且随负荷增大,2 种功率优化模式间的发电成本误差由 0.72% 升为 1.74%,协调优化的优势更为明显。此外,有功无功协调优化的计算时间大于有功无功解耦优化,但 2 种优化模式间的计算时间误差随负荷增大由 244% 降为 79%,说明在输电线路负载能力范围内,大负荷且对实时性要求不高的场景,通常协调优化效果更好;小负荷场景,通常解耦优化更有优势。

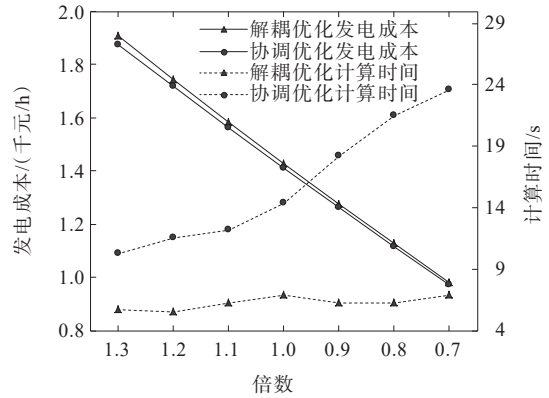


图 13 不同负荷水平下 2 种优化模式的发电成本与计算时间

Figure 13 Power generation cost and calculation time of two optimization modes with different load levels

### 3.6 不同优化模式下主网及 DG 的 P-Q 曲线分析

不同功率因数下 2 种优化模式配电网从主网吸收的有功功率和无功功率如图 14 所示, DG<sub>3</sub> 的有功出力 and 无功出力如图 15 所示。

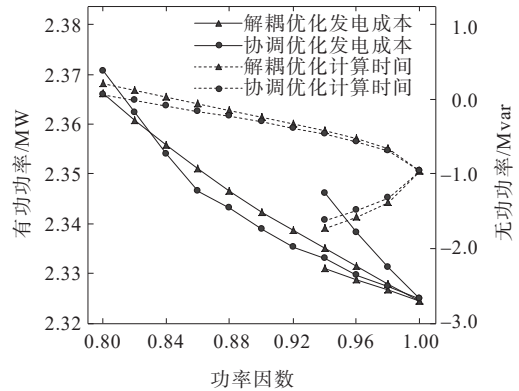


图 14 不同功率因数下 2 种优化模式配电网从主网吸收的有功功率和无功功率

Figure 14 Active and reactive power absorbed by distribution network from main network of two optimization modes with different power factor

由图 14 可知,功率因数从 0.80 增至 1 过程中,感性负荷不断减小,协调优化发出无功略大于解耦优化;功率因数从 1 减至 0.94 过程中,容性负荷不断增大,协调优化发出无功小于解耦优化。当功率因数小于 0.84 时,协调优化从主网吸收有功大于解耦优化;随着功率因数从 0.84 增至 1,协调优化吸收的有功小于解耦优化。这是因为功率因数越小,有功无功耦合性越强,协调优化可以较好地协调从主网购电、DG 有功和无功出力的发电成本,总成本低于解耦优化。

由图 15 可知,功率因数在 0.88~1,2 种优化模式 DG<sub>3</sub> 无功出力基本相同,而协调优化 DG<sub>3</sub> 有功出

力小于解耦优化;功率因数小于0.88时,协调优化 $DG_3$ 无功出力大于解耦优化,此时协调优化 $DG_3$ 有功出力有较明显下降。这是因为功率因数越小,有功无功耦合性越强,协调优化通过 $DG$ 有功、无功出力的协调更好地安排发电计划。

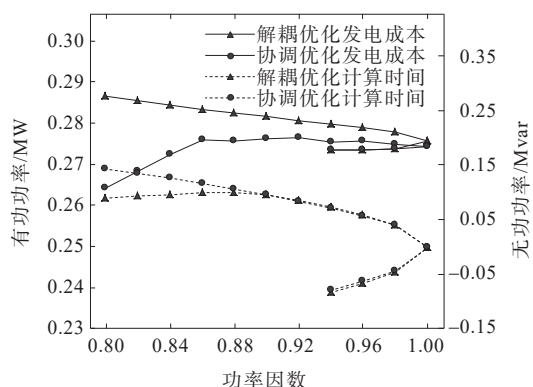


图15 不同功率因数下2种优化模式 $DG_3$ 的有功出力和无功出力

Figure 15 Active and reactive output of  $DG_3$  of two optimization modes with different power factor

### 3.7 不同优化模式下的 $DG$ 出力分析

系统各 $DG$ 在2种优化模式下的有功无功出力结果如表6所示。

表6 2种优化模式下原系统各 $DG$ 有功无功出力

Table 6 Active and reactive power output of each  $DG$  in the original system under two optimization modes

DG	DG有功出力/(MW)		DG无功出力/(Mvar)	
	解耦优化	协调优化	解耦优化	协调优化
WT	0.200 0	0.200 0	0.000 0	0.000 0
PV <sub>1</sub>	0.200 0	0.200 0	0.000 1	0.001 8
PV <sub>2</sub>	0.285 0	0.276 9	0.090 8	0.090 5
MT	0.300 0	0.290 8	0.000 6	0.073 7
PV <sub>3</sub>	0.500 0	0.498 8	0.000 5	0.035 0

由表6可知,解耦优化结果中,除 $PV_2$ 外各 $DG$ 有功基本满发。然而,对比协调优化结果, $PV_2$ 、 $MT$ 、 $PV_3$ 有功出力都有所降低, $PV_1$ 、 $MT$ 、 $PV_3$ 的无功出力较解耦优化有所提高,可以更好地满足相邻负荷的无功需求。因此,协调优化综合考虑各 $DG$ 的有功、无功出力以及负荷的空间分布,对系统整体的优化调度结果优于解耦优化。

## 4 结语

该文以运行时间和总发电成本为优化性能的

评判指标,分析了上网电价、网络参数和功率因数等因素对配电网有功无功协调优化与二者解耦优化的影响,得出如下结论。

1) 新能源上网电价是否得到补贴,对优化结果的影响较大,其中采用补贴后的上网电价计算,优化结果更好,且有功无功协调优化的经济性更好。

2) 阻抗比、线路长度与功率优化目标呈正相关;阻抗比和线路长度越大,有功功率和无功功率之间的耦合关系越强。对于架空线截面积较小、中等以上长度线路,有功无功协调的优化效果更好。

3) 功率因数、负荷水平与功率优化目标呈正相关;在输电线路负载能力范围内,功率因数越小,有功无功耦合性越大,有功无功协调的优化效果越好;负荷水平越高,协调优化效果通常更好。

4) 有功无功协调优化的计算结果优于解耦优化,但是计算时间较长,因此协调优化适用于对计算实时性要求不高的场景。对于阻抗比较小、功率因数较大等有功无功耦合性较弱的场景,2种优化模式的计算结果差距不明显,通常采用解耦优化。

### 参考文献:

- [1] 宫娅宁,秦红,付洪斌,等.考虑源荷不确定性的光伏发电系统优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):112-118.  
GONG Yaning, QIN Hong, FU Hongbin, et al. Optimal schedule strategy for photovoltaic generation system considering the uncertainty in source and load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 112-118.
- [2] 张璐,唐巍,梁军,等.基于VSC的交直流混合中压配电网功率—电压协调控制[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6067-6075.  
ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control in hybrid AC/DC medium voltage distribution networks based on VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6067-6075.
- [3] CHEN L J, DENG Z L, XU X H. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1021-1032.
- [4] 金国彬,刘玉龙,李国庆,等.考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):59-70.  
JIN Guobin, LIU Yulong, LI Guoqing, et al. Collaborative

- optimization planning of an AC/DC hybrid distribution network frame and distributed power generation considering reliability[J]. *Power System Protection and Control*,2022,50(22):59-70.
- [5] ZHANG L, TANG W, LIANG J, et al. Coordinated day-ahead reactive power dispatch in distribution network based on real power forecast errors[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2016,31(3):2472-2480.
- [6] 姚天亮,刘乔,刘金鹏,等.考虑风光互补的输储联合规划方法研究[J]. *电网与清洁能源*,2022,38(7):118-126.  
YAO Tianliang, LIU Qiao, LIU Jinpeng, et al. Research on joint planning methods for energy storage and transmission network considering complementarity of wind power and PV[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022,38(7):118-126.
- [7] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等.主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. *中国电机工程学报*,2017,37(6):1634-1645.  
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. *Proceedings of the CSEE*,2017,37(6):1634-1645.
- [8] 肖安南,张蔚翔,张超,等.含光伏发电与储能的配电网基于源—网—荷互动模式下电压安全最优控制策略[J]. *电力科学与技术学报*,2020,35(2):120-127.  
XIAO Annan, ZHANG Weixiang, ZHANG Chao, et al. Voltage security optimal control strategy of distribution network with PVs and ESs under "Source-Grid-Load" interaction[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2020,35(2):120-127.
- [9] 任佳依,顾伟,王勇,等.基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(5):1397-1407.  
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5):1397-1407.
- [10] 刘洪,徐正阳,葛少云,等.考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制[J]. *电力系统自动化*, 2019,43(11):51-62.  
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive and voltage control for active distribution network considering regulation effect of energy storage[J]. *Automation of Electric Power System*, 2019,43(11):51-62.
- [11] 杨亘焯,孙荣富,丁然,等.计及光伏多状态调节能力的配电网多时间尺度电压优化[J]. *中国电力*,2022,55(3):105-114.  
YANG Genye, SUN Rongfu, DING Ran, et al. Multi time scale reactive power and voltage optimization of distribution network considering photovoltaic multi state regulation capability[J]. *Electric Power*, 2022, 55(3):105-114.
- [12] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等.基于储能型APF的微电网电能质量综合治理[J]. *高压电器*,2022,58(8):238-244.  
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022,58(8):238-244.
- [13] 孙伟卿,王承民,张焰,等.电力系统综合节能的有功与无功功率协调优化[J]. *电机与控制学报*,2010,14(7):41-47.  
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan, et al. Active/ reactive power coordinated optimization in power systems comprehensive energy saving[J]. *Electric Machines and Control*,2010,14(7):41-47.
- [14] 黄敬尧,侯登旭,朱嘉帅,等.考虑电动汽车移动储能的微电网调度[J]. *电测与仪表*,2021,58(2):81-88.  
HUANG Jingyao, HOU Dengxu, ZHU Jiashuai, et al. The micro-grid scheduling considering mobile energy storage of electric vehicles[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2021,58(2):81-88.
- [15] 闫桂杭,班国邦,余斌,等.考虑风光接入的柔性互联配电网概率潮流算法研究[J]. *供用电*,2022,39(5):41-47+60.  
YAN Guihang, BAN Guobang, YU Bin, et al. Research on probabilistic power flow algorithm of flexible interconnected distribution network with wind and solar access[J]. *Distribution & Utilization*,2022,39(5):41-47+60.
- [16] 黎文安. *电气设备手册*[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007:3922-3952.  
LI Wen'an. *Electrical equipment manual*[M]. Beijing: China Water & Power Press,2007:3922-3952.
- [17] 叶耀,龚锦霞,李琛舟,等.一种考虑分布式电源的配电网自动化系统规划方法[J]. *智慧电力*,2022,50(10):109-115.  
YE Yao, GONG Jinxia, LI Chenzhou, et al. A planning method for distribution automation system considering distributed generation[J]. *Smart Power*, 2022, 50(10):109-115.
- [18] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2):1401-1407.
- [19] 张粒子,谢国辉,朱泽,等.准市场化的节能发电调度模式[J]. *电力系统自动化*,2009,33(8):29-32+43.  
ZHANG Lizi, XIE Guohui, ZHU Ze, et al. Quasi marketization model of energy-saving generation dispatching[J]. *Automation of Electric Power System*,2009, 33(8):29-32+43.