

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221881

# 基于电机群分类聚合的配电台区功率调节特性及主动调压方法研究

王翔, 袁佩娥, 陈国富, 慕小斌, 刘壮壮, 戴凤娇

(先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209)

**摘要:** 随着新能源渗透率的不断提高, 配电网主动调压成为维持系统稳定的重要手段。为研究当今负荷多样化配电台区的主动调压方法, 首先研究了电机负载类型、负载率存在差异时的电压-功率调节特性, 揭示了电机功率受带载情况影响的原因。提出了一种基于负载类型与负载率的台区电机分类方法, 并建立了台区电机群分类聚合模型, 能够有效降低模型复杂度。其次采用分类聚合模型研究了配电台区整体电压-功率调节特性, 计及了静态、动态和电力电子等不同负荷类型及占比的多因素影响, 并以实际农、商两典型行业为特例进行仿真分析。最后提出了配电台区主动调压方法。针对系统无功充足或无功不足两种情形以及台区主要负荷类型, 调节电压使消耗有功或无功达到最小, 实现系统经济运行。

**关键词:** 电动机; 聚合模型; 负荷类型; 主动调压; 配电台区

## Power regulation characteristics and active voltage regulation method of a distribution station area based on motor group classification aggregation

WANG Xiang, YUAN Peie, CHEN Guofu, MU Xiaobin, LIU Zhuangzhuang, DAI Fengjiao  
(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

**Abstract:** With the increasing penetration of renewable energy, active voltage regulation of a distribution network has become an important way to maintain system stability. To study the active voltage regulation method in a current power distribution station area with load diversification, first, the voltage-power regulation characteristics of the motor with different load types and load rates are studied, and the impact of the load conditions on motor power is revealed. This paper proposes a classification method of station area motors based on load type and load rate, and establishes a classification aggregation model of the motors, one which can effectively reduce the complexity of the model. Then, the overall voltage-power regulation characteristics of the distribution station area are studied using the classification aggregation model, considering different load types and proportions such as static, dynamic and power electronic load. Additionally, actual agricultural and commercial industries are analyzed as examples. Finally, the active voltage regulation method in the distribution station area is proposed. Considering situations of both sufficient or insufficient reactive power of the system and main load types in the station area, the voltage is adjusted to minimize the consumption of active or reactive power, realizing the economic operation of the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 72188101).

**Key words:** motor; aggregation model; load type; active voltage regulation; distribution station area

## 0 引言

新型电力系统建设需要电网规模化接入新能源,

然而由于新能源具有间歇性、波动性等特性<sup>[1-3]</sup>, 电源侧调节资源非常有限, 因此若要维持电网稳定运行, 就要加强源荷互动, 发展负荷侧能量管理, 加强负荷侧动态响应<sup>[4-6]</sup>。电动机作为电力系统的主要动态负荷, 年耗电量达全社会用电量的60%以上, 因此研究电机群参数聚合作为负荷和如何参与负荷

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(72188101); 国网智能电网研究院有限公司项目资助(525500200057)

侧调节成为负荷主动调控面临的重要课题。

目前,有载调压技术是主动调节负荷侧功率的主要手段,该技术主要依靠有载分接开关(on load tap changer, OLTC)<sup>[7-9]</sup>,已有大量文献在其电压-功率调节特性方面开展研究。例如文献[10]研究了OLTC动态调节对电压稳定性的影响,并提出一种可以评估中长期电压稳定性的指标;文献[11-12]提出了新的主动配电网无功约束优化方法。在降低配电网损耗方面,文献[13]提出了电能替代背景下配电网OLTC降损方法;文献[14]证明了基于真空有载调压开关的少维护OLTC具有节能减耗效果。在OLTC本身设计方面,文献[15]设计了新型的OLTC设备;文献[16]介绍了永磁直动真空OLTC的特点及在配电系统中的实际应用情况;文献[17]研究了OLTC本身的运行状态;文献[18]给出了一种基于电力电子开关的有载调压结构。然而上述多数文献并未计及感应电动机群并结合负载特性分析系统的调压-功率特性。为此,文献[19-21]提出了计及感应电机静态稳定特性和系统稳定性的聚合方法;文献[22-23]将电动机聚合方法应用于稳定性的研究。而在非工频感应电机负荷聚合方面,文献[24-27]提出了空调负荷聚合功率模型。然而,以往研究并未深入考虑电机群带不同负载类型、负载率时的负荷特性,导致调压无法满足实际台区系统复杂工况下的调控需求;随着配电台区负荷类型多样化,建立适用于台区调压场景的感应电机聚合模型,并针对台区不同负荷类型及占比情况采用合适的负荷侧主动电压调控方法仍有待研究。

针对配电台区主动调压场景下的电机群聚合问题,本文首先研究了电机带不同类型负载以及不同负载大小时的调压特性,以此提出了一种基于负载类型与负载率的台区电机群聚合模型,仿真验证了其正确性。随后本文针对典型台区系统中静态、动态、电力电子负荷3种负荷类型,研究了台区整体调压特性,其中动态负荷模型将负荷节点中并联的所有电机依据负载率与负载类型分类聚合为5台电机进行分析。最后针对农、商两行业进行仿真,研究了不同负荷类型及不同负荷占比条件下的台区电压调节特性,探索了台区的整体调压方法。

## 1 电机带不同类型负载时的调压特性

### 1.1 带恒功率或恒转矩负载

为了研究台区内电机群的整体电压-功率调节特性,首先需要对单台电机调压特性进行研究。当电机带恒功率负载时,电机负载转矩与转速成反比,

如式(1)所示。

$$T_L = \frac{k}{\omega_r} \quad (1)$$

式中: $T_L$ 为电机负载转矩; $k$ 为电机负载率; $\omega_r$ 为电机转速标么值。

以一台220 kW、380 V感应电机带恒功率负载运行工况为例,调节电机定子电压标么值在0.8~1.2 p.u.范围内变化,不同负载率时的电压-功率关系曲线如图1和图2所示。为更清晰地进行对比,图中功率采用相对值,其基准为额定电压时各负载率的相应功率。所研究电机参数见表1中的M5。

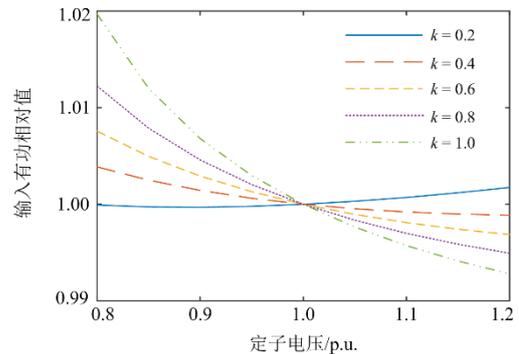


图1 电机带恒功率或恒转矩负载时的输入有功调节曲线

Fig. 1 Motor input active power regulation curve with constant power or constant torque load

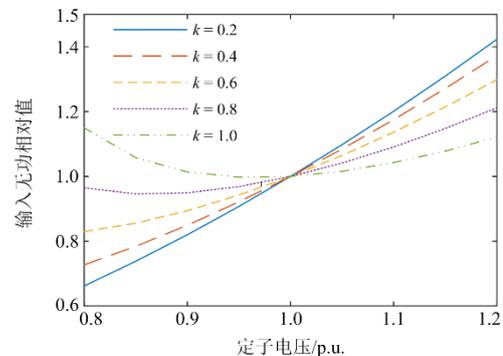


图2 电机带恒功率或恒转矩负载时的输入无功调节曲线

Fig. 2 Motor input reactive power regulation curve with constant power or constant torque load

由图1可以看出,定子电压偏差时,输入有功变化趋势与电机负载率相关。当电机轻载时,电压越大,电机有功功率越大。这是因为电机轻载时,转速接近同步转速,电压升高造成的电机转速增加不显著。由电机等值电路,定子电流将上升,定转子铜耗上升,同时负载率不变时机械功率不变,导致输入有功功率上升。而当电机重载时,电压上升,转速上升显著,造成电机整体阻抗上升显著,定子

电流减小, 导致定转子铜耗减小, 输入功率降低。

由图2可以看出, 电压增大, 在轻载时输入无功增大; 而在重载时输入无功先降低后升高。这是因为定子电压上升, 轻载时定子电流上升, 重载时定子电流下降; 同时由转速变化导致转子支路和励磁支路电流分配关系不同两方面因素引起的。

表1 电机参数表

Table 1 Parameters of motors

编号	额定功率/kW	额定电压/V	定子电阻/p.u.	转子电阻/p.u.	定子漏抗/p.u.	转子漏抗/p.u.	励磁电抗/p.u.	额定转差率	极对数
M1	1.1	380	0.0595	0.0473	0.0576	0.0779	1.3160	0.0760	2
M2	1.5	380	0.0495	0.0474	0.0595	0.0825	1.3955	0.0710	2
M3	3	380	0.0417	0.0338	0.0555	0.0598	2.2119	0.0448	1
M4	110	380	0.0111	0.0112	0.0829	0.1468	1.9102	0.0132	5
M5	220	380	0.0090	0.0096	0.0797	0.1519	2.4612	0.0111	4
M6	315	380	0.0075	0.0072	0.0641	0.1406	4.3535	0.0080	2
M7	1117	2300	0.0110	0.0069	0.0870	0.0870	4.6000	0.0090	2
M8	1676	2300	0.0082	0.0062	0.0770	0.0770	4.5000	0.0080	2
M9	4470	4160	0.0049	0.0049	0.0082	0.0082	6.1000	0.0070	2

## 1.2 带风机水泵类负载

带风机水泵类负载时电机负载转矩与电机转速平方成正比, 如式(2)所示。

$$T_L = A\omega_r^2 \quad (2)$$

式中,  $A$  为二次转矩系数。

仍以电机 M5 为例, 带风机水泵类负载, 转矩系数  $A$  不同时, 电压-功率关系曲线如图3和图4所示。

由图3和图4可知, 带风机水泵类负载时电机输入有功随电压的升高而升高, 与转矩系数  $A$  无关; 而电机输入无功在非重载情况下 ( $A \leq 0.8$ ) 随电压升高而升高。此外, 对比图1与图3可知, 电机带恒功率或恒转矩负载与风机水泵类负载的电压-功率调节特性不一致。因此研究台区多台电机的功率-电压调节特性时, 有必要对电机负载类型及负载率进行分类讨论。

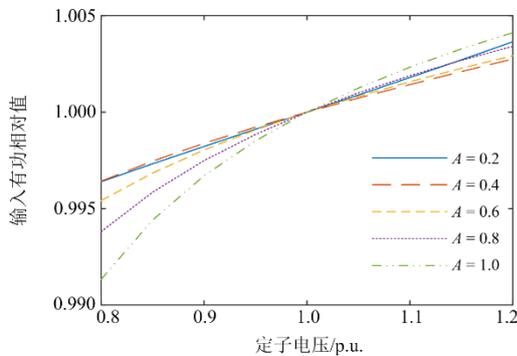


图3 电机带风机水泵类负载时的输入有功调节曲线

Fig. 3 Motor input active power regulation curve with fan or water pump load

此外, 电机带恒转矩负载时的电机转速比带恒功率负载时偏大, 导致机械功率有所下降, 且负载越大、电压越低, 该现象越显著。仿真结果表明, 机械功率变化并不影响输入功率变化趋势, 即带恒转矩与恒功率负载时, 电压-功率调节特性基本一致。故可将电机带恒功率与恒转矩负载归为一类。

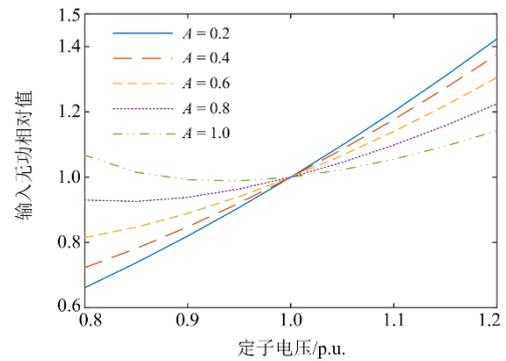


图4 电机带风机水泵类负载时的输入无功调节曲线

Fig. 4 Motor input reactive power regulation curve with fan or water pump load

## 2 基于负载类型与负载率的台区电机群聚合模型

### 2.1 基于负载类型及负载率的电机聚类方法

由于电力系统中电机负荷主要分布在配电网, 故在大型系统仿真中, 通常将多台并联电机等效为聚合电机, 以提高仿真效率。针对台区负荷侧主动调压场景, 聚合电机需要精确体现多台电机在不同电压下的功率特性。由第1节仿真结果可知, 建立电机聚合模型需要考虑电机所带负载类型以及负载率两方面因素, 因此本节提出基于负载类型与负载率的电机聚类方法。

该方法的基本思想是将电压-功率调节特性相同的多台电机聚合为一台电机。基于第1节仿真结果, 对带恒功率或恒转矩负载的电机提出有功临界

负载率  $K_p$  与无功临界负载率  $K_Q$ ，将待聚合电机按负载率划分为  $(0, K_p)$ 、 $(K_p, K_Q)$ 、 $(K_Q, 1.2)$  3 个区间，且每个区间内电机的电压-功率调节特性相同，因此对某一负载率区间内的电机进行聚合是合理的。由  $K_p$ 、 $K_Q$  分隔的负载率区间内，随着定子电压升高，电机输入功率变化趋势如表 2 所示。

表 2 负载率与电压调节特性的关系

Table 2 Relationship between load rate and voltage regulation characteristics

负载率	$k < K_p$	$k \geq K_p$	$k < K_Q$	$k \geq K_Q$
功率变化趋势	有功单调增加	有功单调减小	无功单调增加	无功先减小后增加

而对于带风机水泵类负载的电机，提出无功临界转矩系数  $A_Q$ ，将转矩系数分为  $(0, A_Q)$ 、 $(A_Q, 1.2)$  两个区间。当  $A < A_Q$  时，无功随电压增大而增大；当  $A > A_Q$  时，无功随电压先减小后增加。在划分转矩系数区间后，再分别对区间内的电机进行聚合。需要指出，由于电压升高时电机输入有功变化趋势与  $A$  无关，故无须提出有功临界转矩系数的概念。

为确定上述聚类方法中的 3 个参数  $K_p$ 、 $K_Q$ 、 $A_Q$ ，首先仿真得到表 1 中 9 台电机的临界负载率与临界负载转矩系数，再取平均值，以近似表征所有电机，如式(3)~式(5)所示。需要指出的是，对于实际台区系统，计算  $K_p$ 、 $K_Q$ 、 $A_Q$  时应根据台区电机容量及占比情况对各电机的临界负载率及临界转矩系数进行加权，以更好地反映电机群的电压-功率调节特性。此处为便于计算，采用平均值代替。

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^M K_{p,i}}{M} \quad (3)$$

$$K_Q = \frac{\sum_{i=1}^M K_{Q,i}}{M} \quad (4)$$

$$A_Q = \frac{\sum_{i=1}^M A_{Q,i}}{M} \quad (5)$$

式中： $K_{p,i}$ 、 $K_{Q,i}$  和  $A_{Q,i}$  分别为第  $i$  台电机的临界负载率和临界转矩系数； $M$  为电机台数，文中  $M=9$ 。

仿真可得表 1 中 9 台电机的  $K_{p,i}$ 、 $K_{Q,i}$ 、 $A_{Q,i}$  值如表 3 所示。由表 3 数据取平均可得， $K_p = 0.24$ 、 $K_Q = 0.81$ ， $A_Q = 0.87$ 。

## 2.2 聚合模型及参数计算

将不同负载类型、不同负载率的电机进行聚类处理后，可分别聚合为一台电机，聚合电机的等值

电路如图 5 所示。

表 3 各电机的临界负载率及临界转矩系数

Table 3 Critical load rate and torque coefficient of each motor

编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
$K_{p,i}$	0.42	0.38	0.28	0.30	0.24	0.14	0.16	0.15	0.12
$K_{Q,i}$	0.89	0.90	0.93	0.78	0.71	0.67	0.67	0.73	1.00
$A_{Q,i}$	1.00	1.00	1.00	0.85	0.80	0.66	0.71	0.79	1.00

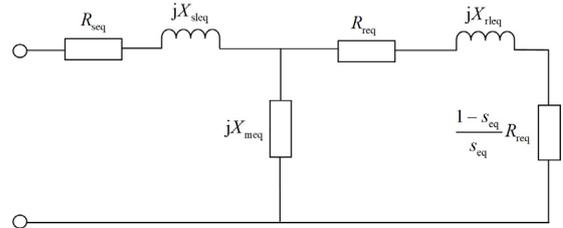


图 5 聚合电机等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit of aggregated motors

聚合电机的电阻、电抗等参数通过容量加权得到，且聚合电机额定容量为各电机容量之和，如式(6)与式(7)所示。

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^p P_{Ni} z_i}{P_{Neq}} \quad (6)$$

$$P_{Neq} = \sum_{i=1}^p P_{Ni} \quad (7)$$

式中：下标“eq”表示聚合电机参数； $z_{eq}$  为聚合电机阻抗，可表示定子电阻  $R_s$ 、定子漏抗  $X_{sl}$ 、转子电阻  $R_r$ 、转子漏抗  $X_{rl}$  和励磁电抗  $X_m$ ； $p$  为处于某一负载率区间内的电机总数； $P_{Ni}$  为第  $i$  台电机的额定功率； $z_i$  表示第  $i$  台电机的阻抗； $P_{Neq}$  为聚合电机额定功率。

聚合电机转差率  $s_{eq}$  根据机端电压及负载转矩计算可得，如式(8)与式(9)所示。

$$T_{Leq} = 3 \left[ \frac{U_{IM} Z_{meq}}{Z_{\Sigma eq} (Z_{meq} + Z_{req})} \right]^2 \frac{R_{req}}{s_{eq}} \quad (8)$$

$$T_{Leq} = \begin{cases} \frac{k_{eq}}{1-s_{eq}} & \text{恒功率负载} \\ A_{eq} (1-s_{eq})^2 & \text{风机类负载} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $T_{Leq}$  为聚合电机的负载转矩； $U_{IM}$  为并联电机的机端电压； $Z_{meq}$ 、 $Z_{\Sigma eq}$ 、 $Z_{req}$  分别为聚合电机的励磁阻抗、总阻抗与转子支路阻抗；聚合电机的负载率  $k_{eq}$  或负载转矩系数  $A_{eq}$  通过容量加权得到，如式(10)与式(11)所示。

$$k_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^p P_{Ni} k_i}{\sum_{i=1}^p P_{Ni}} \quad (10)$$

$$A_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^p P_{Ni} A_i}{\sum_{i=1}^p P_{Ni}} \quad (11)$$

式中:  $k_i$  表示第  $i$  台电机负载率;  $A_i$  表示第  $i$  台电机的转矩系数。

求得各聚合电机参数后, 可以通过图 5 所示等值电路计算所有并联感应电机的总输入有功  $P_{\text{IM}}$  与总输入无功  $Q_{\text{IM}}$ 。

### 2.3 模型验证

为了验证文中聚合模型的有效性, 取表 1 中的几种常见电机, 模拟组合成表 4 中带不同负载的 10 台电机进行聚合, 待聚合电机参数仍与表 1 中相同, 其中带载情况表示当电机带恒功率负载时, 给出负载率  $k$ ; 带风机类水泵类负载时, 给出二次负载系数  $A$ 。实际电机群与聚合电机调压效果对比如图 6 与图 7 所示。图中功率采用相对值表示, 并以额定电压时的功率为基准值。可以看出, 采用文中电机群聚合方法, 能够有效体现调节定子电压导致的功率变化趋势。其中调节电压时, 聚合模型相对实际电机有功相对值偏差小于 0.2%, 无功相对值偏差小

于 0.6%, 表明了电机聚合模型的有效性。

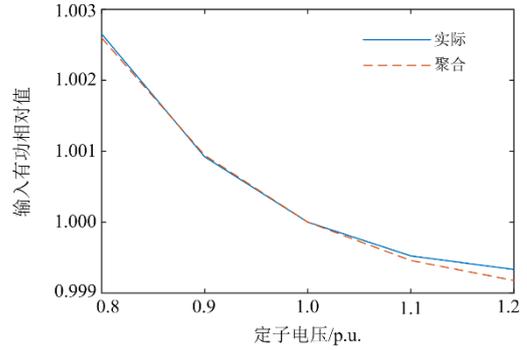


图 6 聚合电机输入有功调节曲线

Fig. 6 Input active power regulation curve of aggregated motor

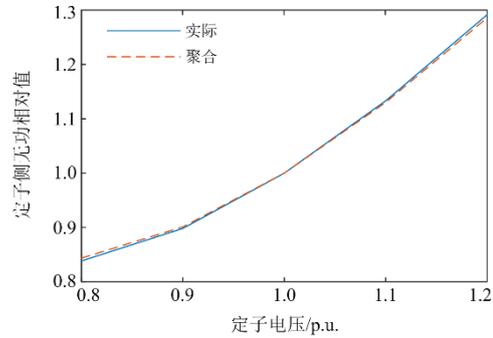


图 7 聚合电机输入无功调节曲线

Fig. 7 Input reactive power regulation curve of aggregated motor

表 4 待聚合电机

Table 4 Motors to be aggregated

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电机	M4	M4	M4	M5	M5	M5	M5	M6	M6	M6
带载情况	$k=0.2$	$k=0.4$	$A=0.7$	$k=0.7$	$k=0.8$	$A=0.4$	$A=0.5$	$k=0.7$	$A=0.5$	$A=0.6$

## 3 典型台区负荷模型建立

### 3.1 典型台区的负荷分类

为了研究典型台区调节负荷侧 OLTC 分接头对于负荷有功、无功调节特性, 考虑图 8 所示典型台区系统。无穷大电源经过升压变压器、电力线路、降压变压器与台区负荷相连。其中负荷类型主要包括以下 3 类。

1) 静态负荷: 这类负荷由恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷 3 部分组成, 可以用典型的功率-电压多项式即 ZIP 模型来表征稳态功率特性, 其中  $Z$  表示阻抗、 $I$  表示电流、 $P$  表示功率。

2) 动态负荷: 动态负荷反映了负荷功率随电压、频率和时间的变化趋势, 其中主要包含感应电动机, 可通过电机暂态等值电路描述其暂态特性。

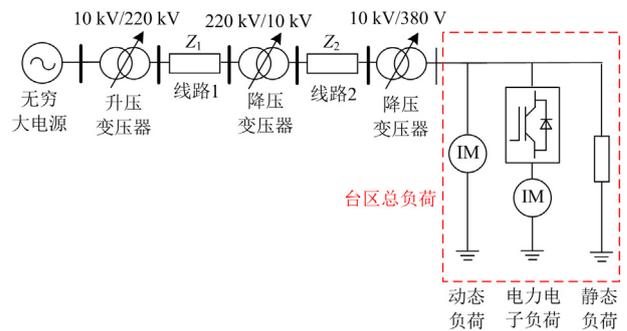


图 8 典型台区系统

Fig. 8 Typical station area system

3) 电力电子负荷: 在新型电力系统中, 各类电力电子器件被广泛应用, 此时功率特性与频率相关, 无法用传统模型表示其功率特性。考虑到行业中常

用的变频空调、电梯等设备均由变频电机驱动，本文以变频电机为例进行研究。

### 3.2 台区负荷模型

#### 3.2.1 静态负荷

稳态条件下，ZIP 模型采用经典电压-功率多项式表示，该多项式由恒阻抗 ( $Z$ )、电流 ( $I$ )、功率 ( $P$ ) 3 部分组成，如式(12)与式(13)所示。

$$P_{ZIP} = P_{ZIP0} \left[ p_{ZIP1} \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_{ZIP2} \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_{ZIP3} \right] \quad (12)$$

$$Q_{ZIP} = Q_{ZIP0} \left[ q_{ZIP1} \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_{ZIP2} \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_{ZIP3} \right] \quad (13)$$

式中： $P_{ZIP}$ 、 $Q_{ZIP}$  分别为 ZIP 模型消耗的有功、无功功率； $P_{ZIP0}$ 、 $Q_{ZIP0}$ 、 $U_0$  分别为有功、无功、电压的稳态值； $U$  为负荷节点电压； $p_{ZIP1}$ 、 $p_{ZIP2}$ 、 $p_{ZIP3}$ 、 $q_{ZIP1}$ 、 $q_{ZIP2}$ 、 $q_{ZIP3}$  分别为该模型恒阻抗、恒电流、恒功率对应的系数。

#### 3.2.2 动态负荷

采用第 2 节中台区电动机聚合模型体现动态负荷的电压-功率调节特性。将台区内一个节点中并联的所有电机聚合为 5 台感应电机，如图 9 所示。其中 3 台体现恒功率负载特性，分别代表电机负载率处于  $(0, K_p)$ 、 $(K_p, K_Q)$ 、 $(K_Q, 1.2)$  3 个区间的电压-功率调节效应；两台体现风机水泵类负载特性，分别代表电机转矩系数处于  $(0, A_Q)$ 、 $(A_Q, 1.2)$  两个区间的电压-功率调节效应。

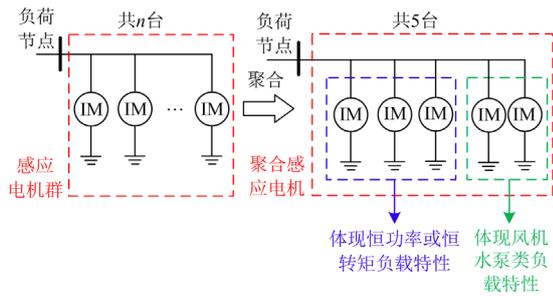


图 9 电机群聚合示意图

Fig. 9 Schematic diagram of motor group aggregation

#### 3.2.3 电力电子负荷

变频电机负荷是电力电子负荷的重要组成部分，其建模主要包括整流部分模型、直流支路模型、逆变器模型、电机模型 4 部分构成<sup>[28]</sup>，通过小扰动分析法，可得变频电机功率如式(14)和式(15)所示。

$$P_{ELC} = P_{ELC0} + G_1 \Delta U + G_2 (\Delta U)^2 + (G_3 + G_4 \Delta U) \Delta f \quad (14)$$

$$Q_{ELC} = Q_{ELC0} + G_5 \Delta U + G_6 (\Delta U)^2 + (G_7 + G_8 \Delta U) \Delta f \quad (15)$$

$$\Delta U = U - U_0 \quad (16)$$

$$\Delta f = f - f_0 \quad (17)$$

式中： $P_{ELC}$ 、 $Q_{ELC}$  分别为电力电子负荷消耗的有功、无功功率； $P_{ELC0}$ 、 $Q_{ELC0}$ 、 $f_0$  分别为电力电子负荷稳态有功功率、无功功率以及频率； $G_1 - G_8$  为传递函数，与电机参数及网侧参数相关； $\Delta U$ 、 $\Delta f$  分别为系统电压、系统频率变化量； $f$  为系统频率。

电力电子负荷的接入会导致谐波污染等问题，下面以一台额定运行的 160 kW 变频调速电机为例进行分析。考虑到配电台区对系统影响很小，负荷节点电压仍接近正弦。电机侧、电源侧 A 相电流如图 10 和图 11 所示。电流谐波含量如表 5 所示。可见，电力电子设备导致电源侧电流含明显谐波分量；电机侧电流谐波较小。此时电源侧存在谐波电流引起的谐波无功(本例谐波无功为 199.4 kvar)，明显降

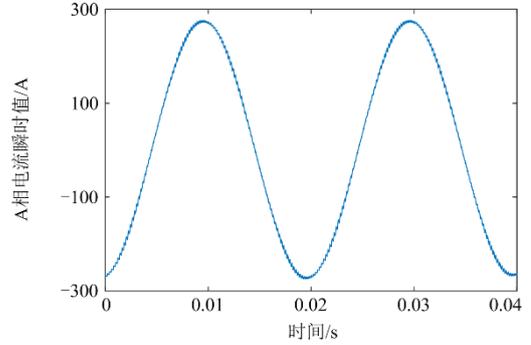


图 10 电机侧 A 相电流

Fig. 10 Phase A current at motor side

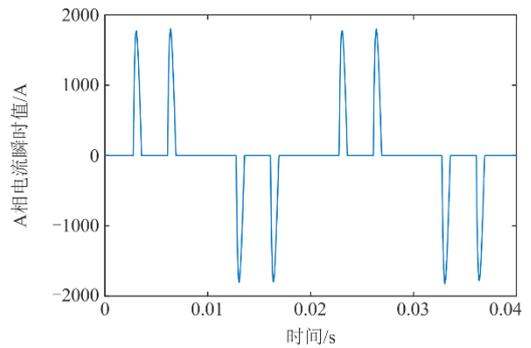


图 11 电源侧 A 相电流

Fig. 11 Phase A current at power supply side

表 5 电流谐波分析

Table 5 Current harmonic analysis

	电机侧		电源侧	
主要谐波次数	98	102	5	7
谐波电流/A	1.73	1.66	217.93	209.30

低系统功率因数。针对含电力电子负荷的台区进行主动调压时有必要考虑这一因素。

## 4 仿真算例

### 4.1 模型搭建

为了研究台区内不同负荷类型及负荷不同占比条件下的电压调节特性,以农业(种植园区)、商业(餐饮业)两行业的负荷情况为例,搭建配电台区负荷模型。其中负荷类型按照第3节分类,两行业的负荷容量及占比参考了用户单位提供的实际调研数据,如表6所示。根据实际场景不同,静态负荷包括照明、加热等设备;动态负荷主要包括感应电机驱动的压缩机、水泵等设备;电力电子负荷主要包括变频电机驱动的变频空调、电梯等设备。采用文中分类聚合方法,得到两行业聚合电机的负载率及转矩系数如表7所示,其中 $k_{eq1} - k_{eq3}$ 表示3台体现恒功率或恒转矩负载特性聚合电机的负载率; $A_{eq1}$ 、 $A_{eq2}$ 表示两台体现风机水泵负载特性聚合电机的转矩系数。其中商业台区案例中电机均带泵类负载,无恒功率或恒转矩类负载。考虑到台区内电机数量达数十台,受篇幅限制,不再展现电机具体参数。此外,考虑到负荷侧调压对大电网影响很小,故认为所有负荷均并联在无穷大电网。

表6 两种行业典型负荷类型及占比

行业	负荷类型	容量/kW	占比/%
种植园区	静态负荷	20	1.7
	动态负荷	693	57.6
	电力电子负荷	491	40.8
餐饮业	静态负荷	65	15.9
	动态负荷	60	14.6
	电力电子负荷	285	69.5

表7 聚合电机负载率及转矩系数

行业	$k_{eq1}$	$k_{eq2}$	$k_{eq3}$	$A_{eq1}$	$A_{eq2}$
农业	0.20	0.80	0.90	0.52	0.95
商业	无	无	无	0.58	无

### 4.2 结果分析

对于农、商两行业,通过调节负荷侧OLTC改变电压对功率的调节特性如表8与表9所示。表中 $P_{all}$ 、 $Q_{all}$ 为台区总负荷有功、无功; $P_{IM}$ 、 $Q_{IM}$ 为动态负荷的有功、无功。不同负荷电压-功率调节相对变化情况如图12—图15所示。

从图12—图15可以看出:

1) 电压变化对静态负荷模型有功调节特性显著,这是因为台区内主要为恒阻抗负荷,有功与电

表8 种植园不同负荷类型的电压-功率曲线

Table 8 Voltage-power regulation effect of different load types in plantation

电压/p.u.	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$P_{all}/kW$	784.4	788.9	793.7	798.8	804.3
$Q_{all}/kvar$	285.0	322.6	376.7	444.6	523.2
$P_{ZIP}/kW$	12.8	16.2	20.0	24.2	28.8
$Q_{ZIP}/kvar$	0	0	0	0	0
$P_{IM}/kW$	415.4	416.5	417.5	418.4	419.3
$Q_{IM}/kvar$	352.3	394.3	452.6	523.7	605.6
$P_{ELC}/kW$	356.2	356.2	356.2	356.2	356.2
$Q_{ELC}/kvar$	-67.3	-71.7	-75.9	-79.1	-82.4

表9 餐饮业不同负荷类型的电压-功率调节特性

Table 9 Voltage-power regulation effect of different load types in catering

电压/p.u.	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$P_{all}/kW$	322.5	333.7	346.2	359.9	375.0
$Q_{all}/kvar$	11.0	15.3	20.5	26.0	31.1
$P_{ZIP}/kW$	41.6	52.6	65.0	78.6	93.6
$Q_{ZIP}/kvar$	15.5	19.7	24.2	29.4	34.8
$P_{IM}/kW$	34.0	34.2	34.3	34.4	34.5
$Q_{IM}/kvar$	17.4	19.6	22.6	26.1	30.2
$P_{ELC}/kW$	246.9	246.9	246.9	246.9	246.9
$Q_{ELC}/kvar$	-21.9	-24.0	-26.3	-29.5	-33.9

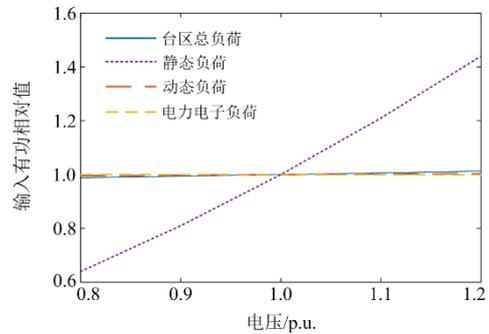


图12 种植园电压-有功曲线

Fig. 12 Voltage-active power curve in plantation

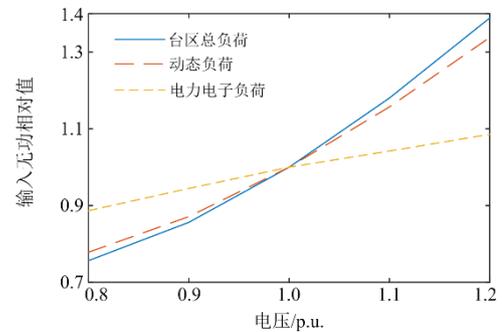


图13 种植园电压-无功曲线

Fig. 13 Voltage-reactive power curve in plantation

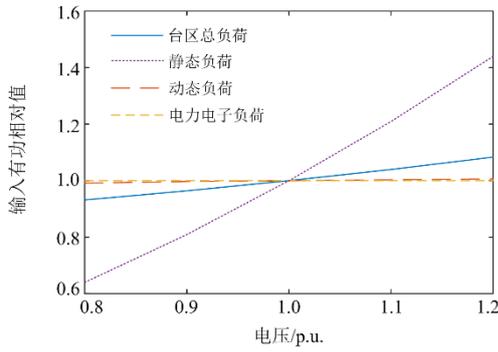


图 14 餐饮业电压-有功曲线

Fig. 14 Voltage-active power curve in catering

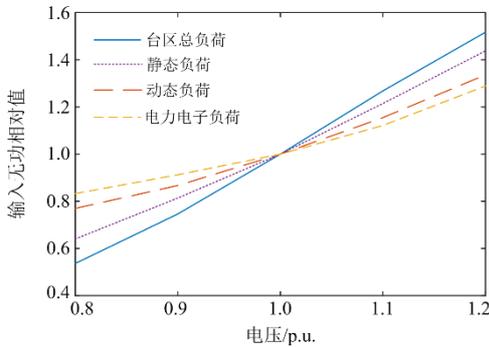


图 15 餐饮业电压-无功曲线

Fig. 15 Voltage-reactive power curve in catering

压的平方成正比。相比之下，电力电子负荷与动态负荷有功变化不显著。其中电机多数带风机类负载，故动态负荷随电压升高，有功上升。而电力电子负荷由于存在控制环节，保证有功基本不变。

2) 电压变化对无功调节效果显著，其中动态负荷无功随电压升高而升高，这是由于电机带水泵类负载占比大导致的；电力电子负荷无功较大，主要包含谐波电流引起的谐波无功，且由于其自身含容性元件，随电压升高无功降低。对于静态负荷，种植园中主要为恒电阻负载，无功几乎为零，故图 13 中无静态负荷曲线；餐饮业中主要为恒阻抗负荷，无功与电压平方成正比。由图 15 可以看出，静态、动态负荷对台区无功调节趋势相近，但根据表 6，静态负荷类型占比较小，在调压中不起主体作用。

#### 4.3 基于负荷类型占比率的台区调压方法

对于含有不同负荷类型及占比的实际台区，结合不同负荷类型的电压-功率调节特性，本文算例台区调压方法如表 10 所示。假设初始电压为额定值，根据不同调压目标，分为以下两种情况。

1) 调压目标为降低负荷无功时，若台区处于重载工况的感应电机占比较大，考虑到其电压-无功调

节曲线最低点接近额定电压的运行点，故不必对电压进行调节。当多数感应电机不处于重载工况或静态负荷占比大时，则适当降低电压。当电力电子负荷占比较大时，适当升高电压。

表 10 台区调压方法

主要负荷类型	典型设备	减小无功	减小有功
静态负荷	ZIP 负荷	降压	降压
动态负荷	恒定负载且处于重载	降压	升压
动态负荷	其他负载	降压	降压
电力电子负荷	变频电机	升压	无明显影响

2) 当系统无功充足，调压目标为降低负荷消耗的有功时，因为电力电子负荷有功对电压调节不敏感，因此无须考虑这类负荷的占比。静态负荷有功对电压调节最敏感，当静态负荷占比达 15.9% 或更大时，其有功调节特性已占整个台区的主导地位，此时可适当降低电压。若台区几乎无静态负荷时，总负荷有功变化不显著。此时，若多数电机带恒功率或恒转矩负载且处于重载工况，可适当升高电压，反之则降低电压。

## 5 结论

针对电机负载类型及重载工况不同研究了电压-功率调节特性，建立了基于负载类型与负载率的台区电机群聚合模型。基于此，研究了计及静态负载、动态负载、电力电子负载的台区整体调压特性。主要结论如下：

1) 电机输入无功多数情况下随电压升高而上升，但电机带恒功率负载且处于重载工况时，无功随电压升高先降低后升高；电机输入有功多数情况下随电压升高而升高，但重载工况时，有功随电压升高而单调下降。

2) 提出了基于负载类型与负载率分类的电机聚合模型，仿真验证了该模型相对实际电机有功相对值偏差小于 0.2%，无功相对值偏差小于 0.6%，验证了聚合模型的有效性。

3) 以含有静态、动态、电力电子不同负荷及占比的实际台区系统为例，搭建配电台区负荷模型，分析了不同负荷及占比情况下的调压特性，并提出了适用于算例台区的调压方法。

## 参考文献

[1] DU Ershun, ZHANG Ning, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.

- [2] 白浩, 袁智勇, 周长城, 等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 66-73.  
BAI Hao, YUAN Zhiyong, ZHOU Changcheng, et al. Dispatching method of maximum power supply capacity of a power distributed network considering fluctuation and correlation of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 66-73.
- [3] 董昱, 董存, 于若英, 等. 基于线性最优潮流的电力系统新能源承载能力分析[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 1-8.  
DONG Yu, DONG Cun, YU Ruoying, et al. Renewable energy capacity assessment in power system based on linearized OPF[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 1-8.
- [4] GERDROODBARI Y Z, RAZZAGHI R, SHAHNIA F. Improving voltage regulation and unbalance in distribution networks using peer-to-peer data sharing between single-phase PV inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2629-2639.
- [5] TANG Zhiyuan, HILL D J, LIU Tao. Distributed coordinated reactive power control for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 312-323.
- [6] 何方波, 赵明, 王楷, 等. 考虑需求响应的源荷协调多目标优化方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(10): 51-58.  
HE Fangbo, ZHAO Ming, WANG Kai, et al. A multi objective optimization method of source load coordination considering demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10): 51-58.
- [7] SAMARASINGHE S, EKANAYAKE C, MA Hui, et al. A risk assessment for utilities to prevent transformer OLTC failures caused by silver sulphide corrosion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2394-2402.
- [8] WU Wenchuan, TIAN Zhuang, ZHANG Boming. An exact linearization method for OLTC of transformer in branch flow model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2475-2476.
- [9] 柳春芳, 陈艺丹, 罗毅初, 等. 含高比例户用光伏的配电台区 OLTC-逆变器电压协调控制策略[J]. 供用电, 2022, 39(5): 70-75, 88.  
LIU Chunfang, CHEN Yidan, LUO Yichu, et al. Voltage coordinated control strategy of OLTC-inverter in distribution transformer area with high-proportion residential photovoltaic[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 70-75, 88.
- [10] 吕思卓, 叶琳, 李晶, 等. 一种计及有载调压变压器动态调节影响的中长期电压稳定评估指标[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 86-92.  
LÜ Sizhuo, YE Lin, LI Jing, et al. A mid-long term voltage stability assessment index considering OLTC dynamic regulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 86-92.
- [11] 卢姬, 常俊晓, 张云阁, 等. 考虑 DG 不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 28-35.  
LU Ji, CHANG Junxiao, ZHANG Yunge, et al. Two-stage reactive power chance-constrained optimization method for an active distribution network considering DG uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 28-35.
- [12] 张蕊, 李铁成, 李晓明, 等. 考虑设备动作损耗的配电网分布式电压无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 31-40.  
ZHANG Rui, LI Tiecheng, LI Xiaoming, et al. Distributed optimization for distribution networks volt/var control considering the operation cost of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 31-40.
- [13] 徐常, 刘金森, 张彦, 等. 电能替代背景下配电网有载调压变压器降损方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 13-17, 26.  
XU Chang, LIU Jinsen, ZHANG Yan, et al. Loss reduction methods of the on-load tap-changer transformer in distribution network under the background of electric energy substitution[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 13-17, 26.
- [14] 李斌, 廖兴万, 马留军, 等. 有载调压配电变压器节能应用研究[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 72-76.  
LI Bin, LIAO Xingwan, MA Liujun, et al. Study of application of a distribution transformer with OLTC on energy conservation[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(6): 72-76.
- [15] 高桂英, 董锐, 夏小晴, 等. 电力电子技术在有载分接开关中应用研究[J]. 电气传动, 2021, 51(6): 73-80.  
GAO Guiying, DONG Rui, XIA Xiaoqing, et al. Study on power electronics application in on-load tap changer[J]. Electric Drive, 2021, 51(6): 73-80.
- [16] 陈波, 张亚杰, 王玉楹. 永磁直动真空有载开关在配电变压器中的应用[J]. 变压器, 2022, 59(7): 19-22.  
CHEN Bo, ZHANG Yajie, WANG Yuying. Application of permanent magnet vacuum on-load tap-changers in distribution transformer[J]. Transformer, 2022, 59(7): 19-22.
- [17] 王开明, 束洪春, 曹立平, 等. 基于相关性分析的 OLTC 运行状态评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 54-59.  
WANG Kaiming, SHU Hongchun, CAO Liping, et al. Study of OLTC running state evaluation method based on

- correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 54-59.
- [18] 杨树德, 曾梓康, 张新闻, 等. 基于电力电子开关的有载调压变压器研究[J]. 电气传动, 2022, 52(19): 33-38.  
YANG Shude, ZENG Zikang, ZHANG Xinwen, et al. Research on on-load voltage regulating transformer based on power electronic switch[J]. Electric Drive, 2022, 52(19): 33-38.
- [19] 陈焯, 程祥, 吴浩, 等. 计及静态临界稳定特性的感应电动机群聚合等值方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2964-2973.  
CHEN Ye, CHENG Xiang, WU Hao, et al. Aggregation of induction motor group considering physical characteristics and static critical stable characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2964-2973.
- [20] 戴丽丽, 黄小庆, 曹一家, 等. 计及系统稳定性和电磁特性的电动机聚合方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(2): 15-21.  
DAI Lili, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Aggregation method of induction motors considering system stability and electromechanical transient characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(2): 15-21.
- [21] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 考虑配电网的感应电动机负荷模型聚合方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 1-4.  
ZHANG Hongbin, TANG Yong, ZHANG Dongxia, et al. Study on aggregation of induction motors with distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 1-4.
- [22] 苏国贇, 杜文娟, 王海风. 并联感应电动机聚合负荷引起含双馈风电场电力系统振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2125-2136.  
SU Guoyun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Research on oscillations of the power system integrated with the DFIG-based wind farm as caused by the aggregated load of induction motors in parallel connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2125-2136.
- [23] 苏国贇, 杜文娟, 王海风. 感应电动机群负荷引起的电力系统机电功率振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5894-5902, 6170.  
SU Guoyun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Research on electromechanical power oscillations in power system caused by induction motor group load[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5894-5902, 6170.
- [24] 范德金, 张姝, 王杨, 等. 考虑用户调节行为多样性的空调负荷聚合商日前调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 133-142.  
FAN Dejin, ZHANG Shu, WANG Yang, et al. Day ahead scheduling strategy for air conditioning load aggregators considering user regulation behavior diversity[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 133-142.
- [25] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.  
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [26] 王永权, 张沛超, 姚垚. 聚合大规模空调负荷的信息物理建模与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6509-6521.  
WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Cyber-physical modeling and control method for aggregating large-scale ACLs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6509-6521.
- [27] 杨济如, 高赐威, 苏卫华. 考虑变频空调负荷聚合调节的电网规划问题研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 38-44.  
YANG Jiru, GAO Ciwei, SU Weihua. Power grid planning considering the aggregated inverter air conditioning load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 38-44.
- [28] 刘述喜, 杨淞淇. 考虑电力电子变换器的电力系统动态负荷建模[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 166-172.  
LIU Shuxi, YANG Songqi. Dynamic load modeling of power system considered power electronic converters[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11): 166-172.

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-01-29

作者简介:

王翔(1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为柔性配电网、柔性交直流输配电; E-mail: apollot9@163.com

袁佩娥(1979—), 女, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为柔性配电网、柔性交直流输配电。E-mail: haixia28@sina.com

(编辑 周金梅)