



基于深度Q网络优化运行方式的风电场次同步振荡抑制策略

陆文安 吴许晗 余一平 李兆伟 郝朝辉 李甘

Suppression Strategy of Subsynchronous Oscillation in Wind Farm Based on Deep Q-learning Network Optimization Operation Mode

LU Wenan, WU Xuhan, YU Yiping, LI Zhaowei, QIE Zhaohui, LI Gan

引用本文:

陆文安, 吴许晗, 余一平, 等. 基于深度Q网络优化运行方式的风电场次同步振荡抑制策略[J]. 现代电力, 2024, 41(3): 448–457. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0336

LU Wenan, WU Xuhan, YU Yiping, et al. Suppression Strategy of Subsynchronous Oscillation in Wind Farm Based on Deep Q-learning Network Optimization Operation Mode[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(3): 448–457. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0336

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0336>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双馈风电场串补送出系统次同步振荡及参数调整分析

Subsynchronous Oscillation Analysis and Parameter Adjustment of Doubly-fed Wind Farm System via Series Compensation
现代电力. 2020, 37(3): 238–244 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0362>

直驱风机对火电机组次同步振荡的影响及抑制方法

Impact of PMSG to Thermal Power Units on Sub-synchronous Oscillation Characteristics and Suppression Strategy
现代电力. 2019, 36(5): 31–38 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/31>

虚拟同步双馈风机对同步机作用路径及低频振荡影响分析

Analysis of Impact of DFIG-based Wind Turbines with Virtual Synchronous Control on the Action Path and Low Frequency Oscillation of Synchronous Generator
现代电力. 2021, 38(3): 237–247 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0260>

高比例风电接入下次同步振荡监测系统次同步相量监测装置多阶段优化配置方法

A Multi-stage Optimal Configuration Method for SPMU of Subsynchronous Oscillation Monitoring System Under High Proportion of Wind Power
现代电力. 2023, 40(1): 18–26 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0239>

基于改进固有时间尺度分解算法的实时次同步振荡监测方法

A Real-time Subsynchronous Oscillation Monitoring Method Using Improved Intrinsic Time-scale Decomposition Algorithm
现代电力. 2023, 40(1): 27–34 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0304>

风电并网系统次/超同步振荡的动态监测方法研究

Research on Dynamic Monitoring Method for Sub/Super-synchronous Oscillation in Wind Power Systems
现代电力. 2019, 36(3): 19–26 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/19>

基于深度Q网络优化运行方式的风电场次同步振荡抑制策略

陆文安¹, 吴许晗¹, 余一平¹, 李兆伟², 郟朝辉², 李甘³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏省南京市 211106; 3. 国网四川省电力公司, 四川省成都市 610041)

Suppression Strategy of Subsynchronous Oscillation in Wind Farm Based on Deep Q-learning Network Optimization Operation Mode

LU Wenan¹, WU Xuhan¹, YU Yiping¹, LI Zhaowei², QIE Zhaohui², LI Gan³

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China; 2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, Jiangsu Province, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

摘要: 随着我国新型电力系统的不断发展, 电力系统次同步振荡问题凸显, 严重影响电网的安全稳定运行, 而振荡阻尼水平对风电场次同步振荡具有重要影响。由于系统阻尼随电力系统运行方式变化, 提出一种基于深度Q网络优化运行方式的风电场次同步振荡抑制策略。首先, 通过时域仿真分析桨距角和串补电容对风电场次同步振荡阻尼的影响, 在此基础上建立桨距角调整风机出力、并联电容调整线路串补的次同步振荡联合优化数学模型。其次, 将深度Q网络算法应用于系统振荡阻尼优化求解问题, 获得风电机组次同步振荡抑制优化策略, 并与基于遗传算法求解的次同步振荡抑制结果对比。结果表明, 该方法有效降低了振荡幅值, 提升了系统的阻尼, 验证了该方法的合理性和优越性。

关键词: 双馈风机; 次同步振荡; 深度Q网络; 阻尼优化; 振荡抑制

Abstract: With the continuous development of new power systems in China, the problem of sub-synchronous oscillation in power systems has become prominent, seriously affecting the safe and stable operation of the power grid, and the level of oscillation damping has an important impact on the sub-synchronous oscillation of wind farms. As the system damping changes with the operation mode of the power system, a sub-synchronous oscillation suppression strategy for wind farms based on the

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助 (5100-202040460A-0-0-00)。

Funded by Science and Technology Project of SGCC Headquarters Management (5100-202040460A-0-0-00)。

deep Q network optimization operation mode was proposed. Firstly, the influence of pitch angle and series compensation capacitor on sub-synchronous oscillation damping of wind farms was analyzed by time domain simulation, and on this basis, a joint optimization mathematical model of sub-synchronous oscillation with adjusting doubly fed induction generator (DFIG) output by pitch angle and adjusting line series compensation by parallel capacitor was established. Secondly, the deep Q-learning network algorithm was applied to the optimization solution of system oscillation damping to obtain the optimization strategy of wind turbine sub-synchronous oscillation suppression, and the results are compared with the results of sub-synchronous oscillation suppression based on the genetic algorithm. The results show that this method effectively reduces the oscillation amplitude and improves the damping of the system, which verifies the rationality and superiority of this method.

Keywords: doubly fed induction generator (DFIG); subsynchronous oscillation; deep Q-learning network; damping optimization; oscillation suppression

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0336

0 引言

高风电占比与高电力电子化设备引起的次同步振荡问题是制约新型电力系统发展的重要问题, 严重危害了电力系统的安全稳定运行, 因此研究风电场次同步振荡的抑制策略具有重要意义。目前, 风电次同步振荡抑制的措施主要分为4类^[1]:

装设柔性输电系统及其附加阻尼控制器、采用附加阻尼控制措施、采取同步滤波器、调节运行方式。

采用附加控制器和滤波装置抑制次同步振荡在近几年受到了国内外学者的广泛关注，抑制效果也很可观，但是由于其控制策略复杂，参数难以整定，在实际电力系统中难以广泛应用。基于运行方式调整的次同步振荡抑制策略仍为主流。风电场运行方式的调整包括机组台数、风速、负荷、桨距角等的改变，采用合理的运行方式可以提高系统的电气阻尼。由于其原理简单，且易于操作控制，在次同步振荡问题中应用广泛。文献[2]根据风电场并入电网的系统等值模型，利用阻抗法分析风电场次同步振荡产生机理，并确定机组台数、风速、负荷、桨距角等因素对次同步振荡的影响以及对应的振荡抑制效果，结果表明运行条件以及系统控制器参数的改变对次同步振荡有重要影响。文献[3]通过调节桨距角，可以实现发电机侧运行方式调节，利用桨距角与风能利用系数之间的关系，间接调节风力发电机出力，实现电力系统振荡的间接调控。文献[4]通过改变负荷有功功率，在用电侧进行运行方式调节，可以在一定程度上调节负荷与电源间的供求平衡，有效解决供求不平衡带来的失稳问题，并实现经济收益；文献[5]通过并联接地电容，在电网侧进行运行方式调节，实现电力系统稳定性调节，保证电力系统安全可靠运行。在电力系统实际运行中，常常需要调节发电机端口电压或输电网络节点电压，通过并联电容补偿电力系统中感性负荷的无功功率，从而提高功率因数，实现改善电压质量，降低线路损耗^[6]。文献[7-8]采用退出线路串补电容、切除风电机组、优化风电场控制参数等运行方式的控制，在实际工程中对风电场次同步振荡进行抑制。

尽管电力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS)、静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM)、静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 等稳定控制装置对电力系统振荡存在非常可观的抑制效果^[9-10]，但其因加入各种复杂的电力电子元件，导致控制参数大幅度增加，控制复杂且难以实现实时数据记录和跟踪调整。为缓解此类问题，计算机人工智能算法逐渐应用于电力系统的安全稳定控制中。深度学习以感知能力为基石，解构复杂多变的环境参数，将

高维问题、耦合性问题解构到简单、通过迭代实现算术更新的状态，结合强化学习理论实现信息交互，实现问题的优化决策，被广泛应用于大型电网、机组与负荷响应、以及能源管理系统^[11]。文献[12]提出仿真平台与大型电网的实际环境进行交互，从数据角度掌握并分析电网电压控制问题，为深度强化学习算法训练提供数据驱动，实现无模型闭环控制代理；文献[13]对能源管理系统的时间表进行在线优化，使用深度 Q 学习和深度策略梯度方法探索学习过程，这 2 种方法都已扩展为可以同时执行多个动作，并在大型数据库中得到验证；文献[14]设计了一种基于深度 Q 学习结构的无模型深度强化学习方法，以优化在使用时间费率和可变电力消耗模式下可控负荷的需求响应管理；文献[15]提出了一种基于近端策略优化的深度强化学习代理，并采用一种使用串行策略的安全控制算法来与代理配合，获取能源收益；文献[16]提出一种基于多参数动作探索机制的竞争深度 Q 网络算法，并设计神经网络结构，以高效地对微电网进行能量管理与优化。可见，深度 Q 网络在电力系统运行方式优化领域应用广泛，且取得了较为满意的结果。

基于此，本文研究基于深度 Q 网络优化运行方式的次同步振荡抑制策略。首先，通过时域仿真分析桨距角和串补电容对风电场次同步振荡阻尼的影响。在此基础上，建立桨距角和并联电容联合优化的次同步振荡数学模型，通过深度 Q 网络对桨距角和并联电容联合寻优，将深度 Q 网络寻优结果进行 PSCAD 时域仿真。通过深度 Q 网络输出策略与 PSCAD 时域仿真结果反复迭代计算，获得抑制风电机组次同步振荡的最优策略，并与基于遗传算法的次同步振荡抑制结果对比，验证了本文所提出的抑制策略的有效性优越性。

1 桨距角和串补电容对次同步振荡的影响

风电场的风速、风机台数、桨距角、串补电容等对风电场次同步振荡都存在一定的影响，本文重点关注风机桨距角和串补电容值 2 个关键因素。在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的风电场经串补并网的次同步振荡时域仿真模型，通过改变风机桨距角以及串联电容值来研究以上 2 个因素

对次同步振荡阻尼比以及幅值的影响，为下文通过优化运行方式抑制风电场次同步振荡奠定基础。

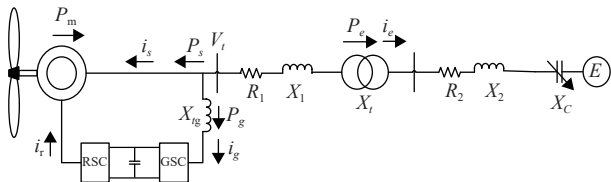


图1 双馈风电场经串补并网的次同步振荡模型
Fig. 1 Subsynchronous oscillation model of doubly-fed wind farm connected to the grid by series compensation

1.1 桨距角对次同步振荡的影响

风机将风能转化为机械能，双馈风机的原理图如图2所示，风力机产生的机械功率 P_m 可用式(1)表示。

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中： ρ 为大气密度； R 是风机叶片中心到叶尖的距离； v 是风力机输入风速； C_p 为风能利用系数，被普遍认可的是以下8参数模型

$$C_p = \left(\frac{c_1}{\lambda} - c_2\beta - c_3\beta^c - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda}} \quad (2)$$

而其中

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + c_7\beta} - \frac{c_8}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_T R}{v} \quad (4)$$

式中： β 是桨距角度数； $c_1 - c_8$ 的取值为定值； λ 是叶尖速比； ω_T 代表的是风力机旋转的角速度。

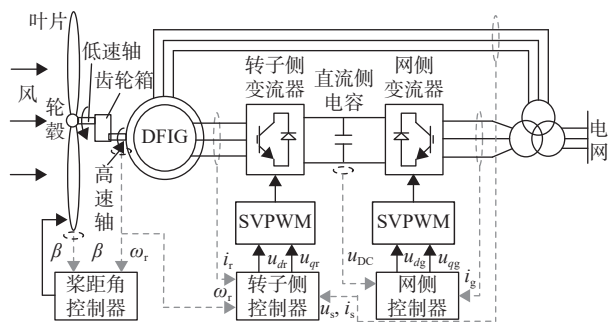


图2 双馈风力发电机组结构图
Fig. 2 Structure diagram of doubly-fed induction generators

在保持其他参数不变的情况下，分别设置桨距角 β 为0.1、0.3、0.5 rad，1.5 s投入串补引发次同步振荡，3种运行工况下的风机电磁转矩TE振荡曲线如图3—5所示。分别将3种工况的电磁转矩进行Prony分析，Prony分析可以准确辨识系统

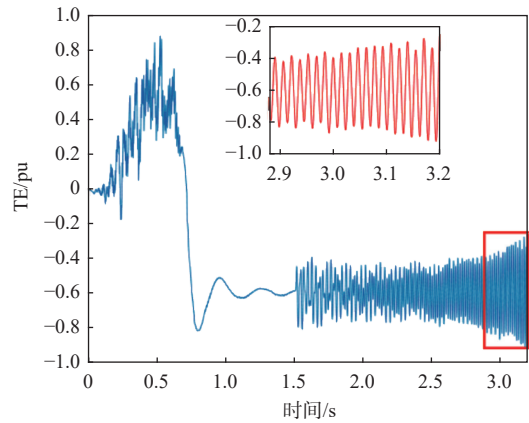


图3 桨距角为0.1 rad时电磁转矩振荡曲线
Fig. 3 Electromagnetic torque oscillation curve when the pitch angle is 0.1 rad

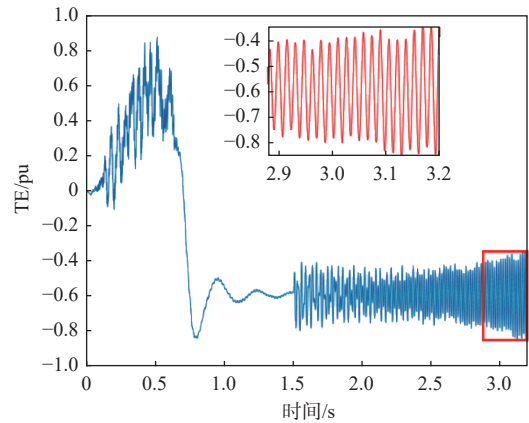


图4 桨距角为0.3 rad时电磁转矩振荡曲线
Fig. 4 Electromagnetic torque oscillation curve when the pitch angle is 0.3 rad

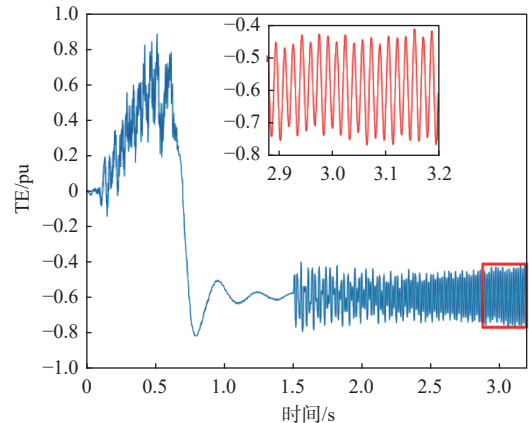


图5 桨距角为0.5 rad时电磁转矩振荡曲线
Fig. 5 Electromagnetic torque oscillation curve when the pitch angle is 0.5 rad

的振荡阻尼^[17]。为了提高Prony分析辨识的准确度，选取仿真时间2.9~3.2 s时间窗辨识次同步振荡的幅值与阻尼比(下同)，所得结果如表1所示。

表 1 不同桨距角下电磁转矩曲线 Prony 分析结果
Table 1 Prony analysis results of electromagnetic torque curve at different pitch angles

桨距角/rad	幅值/pu	频率/Hz	阻尼比
0.1	0.61	37.45	-0.0213
0.3	0.45	38.28	-0.0145
0.5	0.32	38.72	-0.0074

通过以上仿真可以发现，改变桨距角可以实现对系统风能利用率的改变，从而对次同步振荡产生影响。具体表现为，在一定范围内随着桨距角值的增大，次同步振荡的阻尼比逐渐增大，振荡幅值明显衰减，振荡由发散到逐渐收敛，且振荡频率略微增大。因此，可以通过人工智能的方法寻找合理的桨距角参数，以实现抑制次同步振荡的目的。

1.2 线路串补度对次同步振荡的影响

双馈风电场经串补电容并网时，若在某个次同步频率下，双馈风机和电网侧的总电抗等于 0，则会引发次同步振荡，此时次同步谐振频率如式 (5) 所示。

$$f_{er} = f_0 \sqrt{X_C/X_\Sigma} \quad (5)$$

式中： f_0 为同步频率； X_C 为线路串补电容容抗； X_Σ 为系统感抗之和。

次同步振荡频率 f_1 为

$$f_1 = f_0 - f_{er} \quad (6)$$

在次同步频率下，双馈风机的转差率如下

$$s_{er} = 1 - f_r/f_{er} \quad (7)$$

式中： f_r 为转子转速频率； f_{er} 为次同步振荡频率。在次同步频率下，由于 $f_r > f_{er}$ ，故 $s_{er} < 0$ 。

由文献 [18] 可知，双馈风机转子侧等效电阻为

$$R_{req} = (R_r + R_{RSC})/s_{er} \quad (8)$$

式中： R_r 为风机转子电阻； R_{RSC} 为转子侧等效电阻。由上述分析可知， $R_{req} < 0$ ，等效电阻绝对值的大小决定着振荡发散的速度。

线路串补电容补偿度 k 简称串补度，主要由线路当中电感 L 、电容 C 决定，具体数学表达式可以表示为

$$\frac{1}{\omega_0 C} = k\omega_0 L, k \in (0, 1) \quad (9)$$

通过式 (9) 可知，改变系统的串补电容值可以实现线路串补度的改变。串补电容增大，串补

度会减小，导致次同步谐振频率 f_{er} 减小，次同步振荡频率 f_1 增大，从而使得转差率 s_{er} 增大，最终使得转子侧等效电阻的绝对值减小，振荡发散程度降低。

在研究串补度对风电场次同步振荡影响的仿真分析中，桨距角初始值设置为 0.1 rad，系统其他参数与上文桨距角调节仿真分析参数一致，分别设置线路串补电容为 14 μF 和 18 μF ，故障设置为 1.5 s 投入串补电容，在 2 种工况下进行时域仿真，得到的电磁转矩振荡曲线如图 6—7 所示。2 种工况下电磁转矩曲线的振荡幅值和阻尼比如表 2 所示。

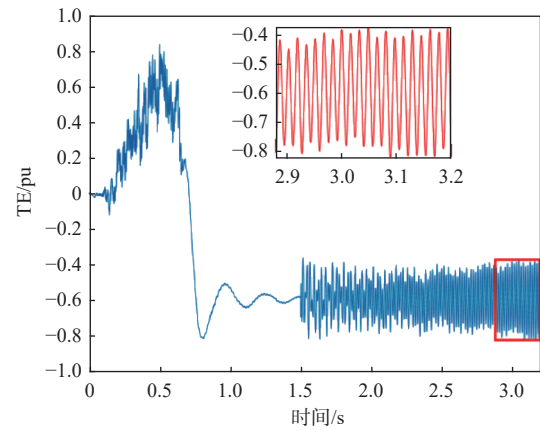


图 6 串补电容为 14 μF 时电磁转矩振荡曲线
Fig. 6 The electromagnetic torque oscillation curve when the series compensation capacitor is 14 μF

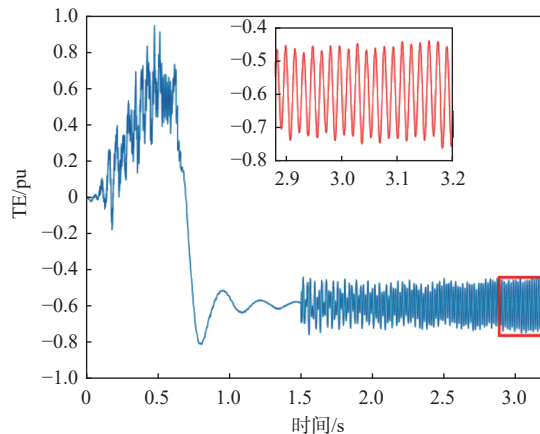


图 7 串补电容为 18 μF 时电磁转矩振荡曲线
Fig. 7 The electromagnetic torque oscillation curve when the series compensation capacitor is 18 μF

通过 2 组仿真对比初始状态发现，串补电容的改变能够对系统次同步振荡幅值、频率、阻尼比产生明显影响，可以考虑通过调整线路串补度

表2 不同串补度下电磁转矩曲线 Prony 分析结果
Table 2 Prony analysis results of electromagnetic torque curves with different series compensation

串补电容/ μF	幅值/pu	频率/Hz	阻尼比
14	0.48	37.71	-0.0181
18	0.25	38.82	-0.0058

来抑制次同步振荡。

但是在实际线路当中，难以直接进行串补电容的调控，故可以采取并联电容的方式对线路串补度进行间接的调整，达到振荡抑制的效果。这需要人工寻找合理的并联电容值，这在电力系统实际运行中并不方便，可以通过人工智能算法自动搜索或计算得到合适的并联电容值，以便快速实现次同步振荡的抑制。

通过以上研究内容可知，桨距角和串补电容对次同步振荡的幅值以及阻尼比具有一定的影响，通过设置合理的桨距角值和并联电容值可以达到抑制风电场次同步振荡的目的。

2 基于深度 Q 网络的风电场次同步振荡抑制策略

2.1 深度 Q 学习双网络构架

深度 Q 网络包含最新数据网络与历史数据网络 2 个神经网络。这 2 个神经网络结构相同，变量不同，分别存储不同时期的风机桨距角、并联电容的状态，以及每一台风电机组在某个状态下调整的桨距角、并联电容所获得的奖励值。

历史数据网络是一个存储滞后信息的网络，在运行过程中存储上一次寻优所得的风机桨距角、并联电容等数据；最新数据网络是一个存储最新信息的网络，保存风机桨距角、并联电容改变值等最新数据。

考虑到运行过程中参数存在迭代更新的问题，每次迭代需要替换原先的数据信息，为了在最新数据网络预测时与历史数据进行对比，采用历史数据网络和最新数据网络这样一个双网络结构，将历史数据网络预测结果与最新数据网络预测结果做差比较。依据差值范围大小，调节下一次控制改变量，实现对风机桨距角、并联电容调节量等数据的学习，从而实现最新数据网络的精确预测。

2.2 深度 Q 网络参数设定

进一步地，采用 Q 网络算法计算该初始状态

对应的每一次迭代过程的 Q 值，包括

$$Q_{t+1} = Q_t + \alpha [r_t + \gamma(Q_{t+1} - Q_t)] \quad (10)$$

式中： Q_t 为第 t 次迭代过程中计算的 Q 值； r_t 为第 t 次迭代过程开始时的状态信息对应的最优动作的奖励值； α 为第 1 预设参数； γ 为第 2 预设参数； $t \in [1, T]$ ， T 为预设迭代次数阈值。

其中，按式 (11) 确定第 t 次迭代过程开始时的状态信息对应的最优动作的奖励值 r_t 。

$$r_t = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ 1, & 0.1 < \Delta\eta_t \leq 0.5 \\ 5, & 0.01 < \Delta\eta_t \leq 0.1 \\ 10, & 0 \leq \Delta\eta_t \leq 0.01 \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\Delta\eta_t$ 为目标次同步振荡阻尼比与第 t 次迭代开始时最优动作的次同步振荡阻尼比的差值。

用 i 表示智能体的运行代数，当智能体迭代到一定步数或者潮流计算不收敛时就停止这一代的迭代计算，开始下一代的迭代计算，当智能体寻优达到 100 代后，智能体停止寻优，输出最优风机桨距角、并联电容与次同步振荡阻尼比最大值。

2.3 联合优化的次同步振荡数学模型

本文把风机桨距角和并联电容作为需要优化调整的变量，其他参数保持不变。通过深度 Q 网络，把风机桨距角、并联电容作为智能体的状态输入，每次有功出力或负荷功率的改变作为智能体的行为，每次阻尼比的变化作为智能体的奖励，通过迭代计算得到系统次同步振荡阻尼比的最大值。

建立计及风机桨距角和并联电容值与目标值构成的目标函数如下

$$F = \max(\zeta_{\min}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M, c_1, c_2, \dots, c_N)) \quad (12)$$

式中： ζ 为系统的振荡阻尼； β_i 为风力发电机桨距角； c_i 为并联电容。

2.4 深度 Q 网络迭代寻优流程

图 8 为本文所提出的基于深度 Q 网络运行优化方式的算法流程图。首先，随机输入风机桨距角、并联电容调节量，执行若干步骤的随机计算，获得对应调节量下的智能体行为、状态、Q 值、奖励值，并将以上信息传输至神经网络中，提供网络学习训练。

在智能体经过若干次迭代学习之后，在神经网络中积累训练了一定程度的历史数据，在这种状态下，预测智能体变量改变后的结果。结合智

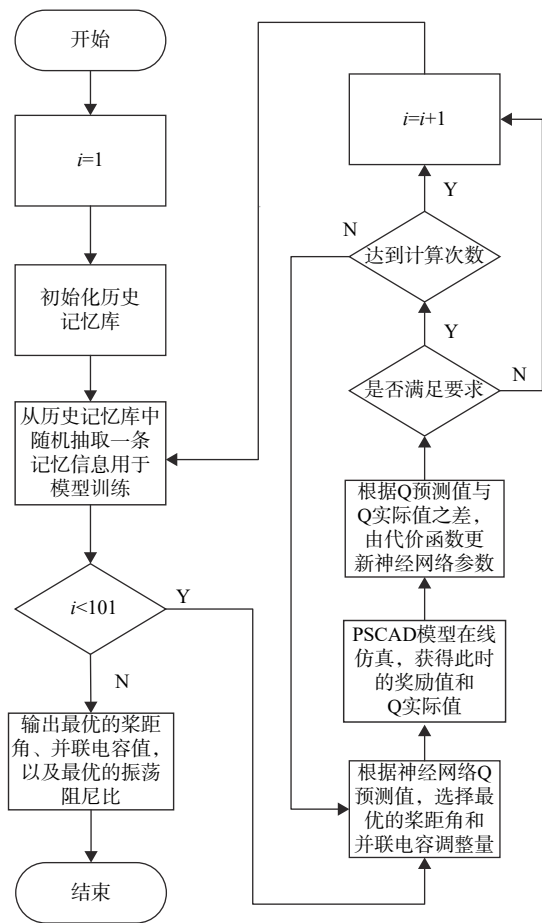


图 8 深度 Q 网络迭代计算流程图

Fig. 8 Iterative calculation flowchart of deep Q-learning network

智能体满足一定低概率随机选择行为的要求，按照贪婪概率选择奖励值最大的行为来执行智能体的下一步变量调整选择，并进行更新迭代操作。在每次更新迭代后，需要将历史神经网络的参数替换为最新网络参数，最新神经网络参数由新一轮数据进行训练获得，通过神经网络参数更新，实现预测精度的提升。最后，当智能体完成一定次数迭代寻优，满足迭代收敛条件后，停止计算，记录寻优过程中所得数据结果。

整个迭代过程，在 MATLAB 中编程执行，通过 PSCAD 仿真平台获取不同桨距角、并联电容设置下的仿真结果，并调用 MATLAB 使用 Prony 分析程序，获得频率、振幅、阻尼比等参数信息。流程图左侧是智能体进行一定步数的随机寻优，通过这次的寻优，智能体有了初步的数据库，在接下来的迭代计算中可以进行初步的预测。中间部分是智能体迭代寻优的过程，用 i 表示智能体

的运行代数，当智能体迭代到一定步数或者潮流计算不收敛时就停止这一代的迭代计算，开始下一代的迭代计算，当智能体寻优达到 100 代后，智能体停止寻优，输出最优风机桨距角、并联电容组合与次同步振荡阻尼比最大值。

3 双馈风电场次同步振荡算例分析

3.1 算例背景

本算例以 IEEE 次同步振荡第一标准模型为依据，结合双馈风力发电机通过串补电容连接无穷大系统为基础，如图 1 所示。设置相应的网络线路参数，并设置相应故障元件及发生时间，1.5 s 投入串补电容产生次同步振荡。

设置线路电感 X_1 为 36.8 mH，线路电感 X_2 为 133.875 mH，线路电阻 R_1 为 2 Ω ，线路串补电容 X_C 为 10 μF 。故障时间设置为：1.5 s 发生故障，线路电容 C_1 接入系统，引发次同步振荡。其中，并联电容和桨距角为联合优化控制变量。电容参数设置范围 5~70 μF ，桨距角参数设置范围 0~ π rad。每组数据均可得到对应的电磁转矩曲线和相应的 Prony 分析曲线，进而可获得相对应的幅值、频率、阻尼比结果。

在此仿真模型的基础上，分别设计基于遗传算法的次同步振荡抑制策略和基于深度 Q 学习算法的次同步振荡抑制策略，通过两者的抑制振荡结果的对比较验证本文所提出方法的有效性和优越性。

3.2 基于深度 Q 学习的次同步振荡抑制结果

在初始状态下，未采用优化算法进行优化时，风机电磁转矩振荡曲线如图 9 所示，振荡呈发散态势。接下来，采用如图 8 所示的深度 Q 网络算法优化系统的桨距角和并联电容值，经过深度 Q 网络若干次迭代计算，系统振荡阻尼比的变化过程如图 10 所示。通过深度 Q 网络优化桨距角和并联电容值后在 PSCAD 中重新进行仿真，优化后风机电磁转矩曲线如图 11 所示，振荡呈衰减态势。选取 3.15 s 至 3.20 s 进行 Prony 分析，曲线拟合效果如图 12 所示，Prony 分析结果，如表 3 所示。

通过深度 Q 网络计算可以发现，经过若干次迭代，深度 Q 网络获得优化结果，并对深度 Q 网络下风机电磁转矩曲线进行 Prony 分析，在 3.15 s 处，曲线幅值为 0.1362 pu，频率为 37.92 Hz，阻尼比为 0.029，对比初始同等状态下曲线幅值为

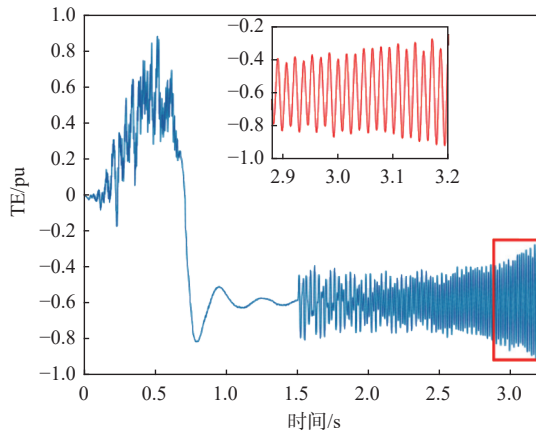


图9 初始情况风机电磁转矩曲线

Fig. 9 Electromagnetic torque curve of doubly fed induction generator in the initial situation

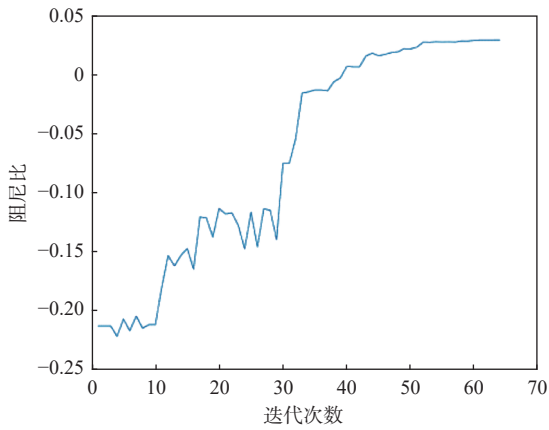


图10 深度Q网络迭代计算结果

Fig. 10 Iterative calculation results of deep Q-learning network

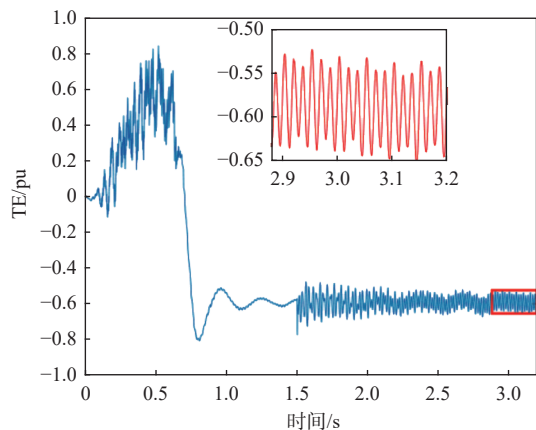


图11 深度Q网络优化后风机电磁转矩曲线

Fig. 11 Electromagnetic torque curve of doubly fed induction generator after optimization of deep Q-learning network

0.61 pu, 频率为 37.45 Hz, 阻尼比为 -0.021 , 该方法实现了负阻尼到正阻尼的改变, 将增幅振荡

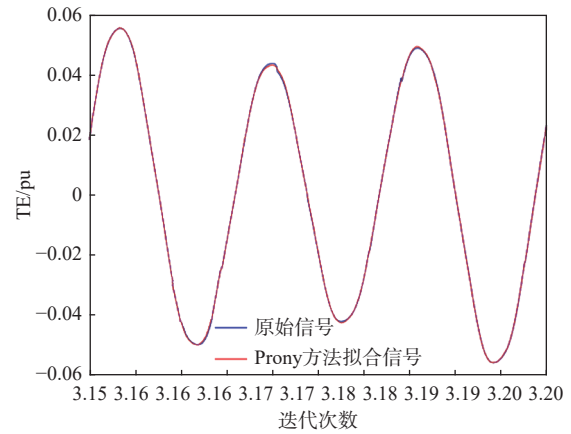


图12 风机电磁转矩 Prony 分析曲线

Fig. 12 Prony analysis curve of electromagnetic torque of doubly fed induction generator

表3 风机电磁转矩 Prony 分析结果

Table 3 Prony analysis results of electromagnetic torque of doubly fed induction generator

并联电容	桨距角/rad	幅值/pu	频率/Hz	阻尼比
46/ μ F	0.8	0.136	37.92	0.029

改变为收敛, 做到了次同步振荡的有效抑制。

4 基于遗传算法的对比验证

遗传算法是一种依据进化论的理论, 应用适应度对个体进行评估筛选, 从而获得最优解的策略^[19]。将遗传算法用于电力系统规划问题, 能使性能最优的运行方式具有更大的被选择可能性。

4.1 基于遗传算法的次同步振荡抑制结果

为了验证上文提出的基于深度 Q 网络算法的有效性和优越性, 采用传统的遗传算法对桨距角和并联电容联合配置参数进行寻优, 获得最终结果。算法迭代过程中阻尼比变化趋势如图 13 所示, 将遗传算法寻优得出的最优桨距角和并联电容值在 PSCAD 中重新进行仿真, 得到的电磁转矩振荡曲线如图 14 所示, 振荡也呈收敛态势。选取 3.15~3.20 s 进行 Prony 分析, 曲线拟合结果如图 15 所示, 拟合的误差可以忽略, 所辨识振荡的幅值、频率、阻尼比如表 4 所示。

遗传算法由于初始值为算法随机生成, 在 3.15s 处的阻尼比低于同等情况下深度 Q 网络的初始值, 经过若干次迭代后, 遗传算法获得优化结果, 此时频率保持相同水平, 阻尼比实现了由负到正, 振荡趋于收敛, 且幅值有明显降低, 表明遗传算法在综合调节桨距角和并联电容的具有

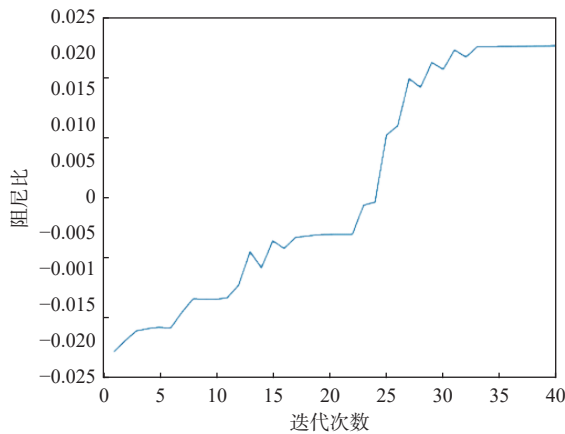


图 13 遗传算法迭代计算结果

Fig. 13 Iterative calculation results of genetic algorithm

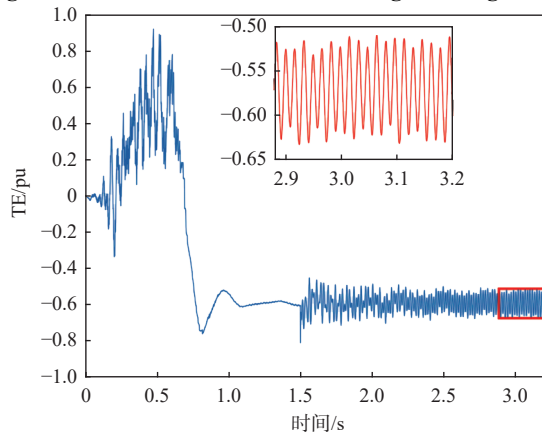


图 14 遗传算法优化后风机电磁转矩曲线

Fig. 14 Electromagnetic torque curve of doubly fed induction generator with genetic algorithm optimization

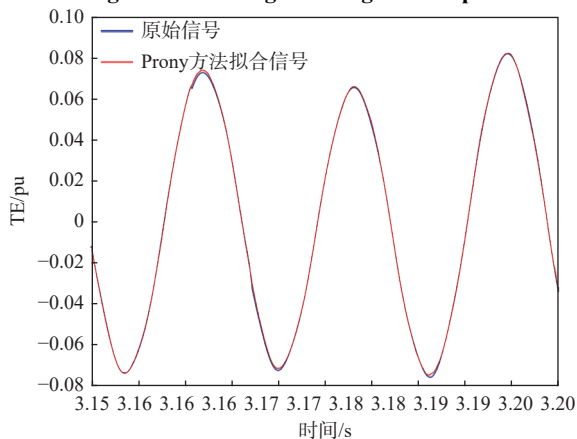


图 15 风机电磁转矩 Prony 分析曲线

Fig. 15 Prony analysis curve of electromagnetic torque of doubly fed induction generator

一定的可行性和有效性。

4.2 深度 Q 网络算法与遗传算法的对比

深度 Q 网络算法与遗传算法的优化结果对比

表 4 遗传算法下风机电磁转矩 Prony 分析结果

Table 4 Prony analysis results of electromagnetic torque of doubly fed induction generator based on genetic algorithm

并联电容	桨距角/rad	幅值/pu	频率/Hz	阻尼比
44/ μ F	0.75	0.1647	37.82	0.0212

结果如表 5 所示。可以发现，与遗传算法相比，深度 Q 网络优化算法能够更有效地降低振荡幅值（降低 17.4%），提高系统阻尼比（提高 38.1%）。仿真结果说明：通过调节桨距角、并联电容改变串补能够有效抑制次同步振荡，且深度 Q 网络的优化效果要优于遗传算法的优化效果。

表 5 不同算法优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results of different algorithms

算法	振荡幅值/pu	振荡频率/Hz	阻尼比
深度 Q 网络	0.1360	37.92	0.029
遗传算法	0.1647	37.82	0.021

另外，在实际电力系统中，电容大多以成组、成群的方式投切，多以 10 μ F、20 μ F 等步长进行增减，此时可进行算法条件限制，设置符合硬件条件的迭代步长或者在计算出最佳电容值时选择相邻整 10 倍电容值进行设置，能够在满足硬件设施的基础上择优整定，达到抑制效果。

5 结论

本文采用深度 Q 网络算法，以桨距角和并联电容作为控制变量，通过迭代优化得出最优的桨距角和并联电容组合值，通过 PSCAD 时域仿真得出风机电磁转矩曲线及阻尼比结果。与不采用优化控制的次同步振荡结果对比可知，振荡明显得到了抑制，验证了桨距角和并联电容控制次同步振荡的有效性。并且与传统的基于遗传算法的优化策略进行对比，深度 Q 网络算法在振荡的幅值以及阻尼比两方面的优化结果都优于遗传算法，验证了该方法具有一定的优越性。

参考文献

- [1] 薛安成, 付潇宇, 乔登科, 等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 118-128.

XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Sum-

- mary and prospect of research on subsynchronous oscillation mechanism of power system involved in wind power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 118–128(in Chinese).
- [2] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(22): 6520–6532.
SUN Kun, YAO Wei, WEN Jingyu. Analysis of subsynchronous oscillation mechanism and characteristics of doubly-fed wind farm via flexible straight grid-connected system[J]. *Proceedings of CSEE*, 2018, 38(22): 6520–6532(in Chinese).
- [3] 鲁玉普, 解大, 孙俊博, 等. 风电场机网扭振的小信号建模及仿真[J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 1120–1127.
LU Yupu, XIE Da, SUN Junbo, *et al.* Small-signal modeling and simulation of torsional vibration of wind farm generator network[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 1120–1127(in Chinese).
- [4] 顾雪平, 周光奇, 李少岩, 等. 考虑风电预测误差相关性的负荷恢复鲁棒优化[J]. *电网技术*, 2018, 30(2): 890–899.
GU Xueping, ZHOU Guangqi, LI Shaoyan, *et al.* Robust optimization of load recovery considering the correlation of wind power forecast errors[J]. *Power System Technology*, 2018, 30(2): 890–899(in Chinese).
- [5] 杨尚瑾, 许海, 宋晓通, 等. 辐射状配电线路串联和并联补偿的兼容性[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 763–768.
YANG Shangjin, XU Hai, SONG Xiaotong, *et al.* Compatibility of series and parallel compensation for radial distribution lines[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 763–768(in Chinese).
- [6] 刘天璋, 吴新振. 并联补偿电容对自励异步发电机运行性能的影响[J]. *电网技术*, 2005, 29(6): 53–57.
LIU Tianzhang, WU Xinzhen. The influence of parallel compensation capacitor on the performance of self-excited asynchronous generator[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(6): 53–57(in Chinese).
- [7] 董晓亮, 田旭, 张勇, 等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 321–328.
DONG Xiaoliang, TIAN Xu, ZHANG Yong, *et al.* Analysis of typical events and influencing factors of subsynchronous resonance in the series compensated transmission system of Guyuan wind farm[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 321–328(in Chinese).
- [8] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1035–1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, *et al.* Research on complex oscillation problems and countermeasures caused by new energy grid-connected system[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1035–1042(in Chinese).
- [9] 毛俞杰, 孙海顺, 韩应生, 等. 采用STATCOM抑制多机系统次同步振荡的理论及仿真[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 23–32.
MAO Yujie, SUN Haishun, HAN Yingsheng, *et al.* Theory and simulation of STATCOM for damping subsynchronous oscillation of a multi-machine system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 23–32(in Chinese).
- [10] 高本锋, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 基于实时数字仿真器的SVC抑制次同步振荡的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(23): 6–10,63.
GAO Benfeng, XIAO Xiangning, ZHAO Chengyong, *et al.* Study on mitigation of SSO with SVC based on RTDS[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(23): 6–10,63(in Chinese).
- [11] VAN H H, GUEZ A, SILVER D. Deep reinforcement learning with double Q-learning[C]//Proceedings of the 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence. Phoenix: AAAI, 2016: 1813–1819.
- [12] DUAN J, SHI D, DIAO R, *et al.* Deep-reinforcement-learning-based autonomous voltage control for power grid operations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 814–817.
- [13] MOCANU E, MOCANU D C, NGUYEN P H, *et al.* Online building energy optimization using deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3698–3708.
- [14] WANG B, LI Y, MING W, *et al.* Deep reinforcement learning method for demand response management of interruptible load[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 3146–3155.
- [15] HUANG B, WANG J. Deep Reinforcement learning-based capacity scheduling for PV-battery storage system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 2272–2283.
- [16] 黎海涛, 申保晨, 杨艳红, 等. 基于改进竞争深度Q网络算法的微电网能量管理与优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7): 42–49.
LI Haitao, SHEN Baochen, YANG Yanhong, *et al.* Energy management and optimization strategy for microgrid based

on improved dueling deep Q network algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 42–49(in Chinese).

- [17] 向玮华, 班连庚, 周佩朋. 基于机器学习可解释代理模型的风电次同步振荡在线预测及优化控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 67–75.

XIANG Weihua, BAN Liangeng, ZHOU Peipeng. Online prediction and optimal control method for subsynchronous oscillation of wind power based on an interpretable surrogate model for machine learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 67–75(in Chinese).

- [18] 赵斌. 双馈风电场并网系统的次同步振荡特性及抑制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

- [19] 徐小琴, 郑旭, 王思聪, 等. 基于改进遗传退火算法的输配电网协调规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 124–131.

XU Xiaoqin, ZHENG Xu, WANG Sicong, *et al.* Coordination planning method of transmission and distribution network based on improved genetic annealing algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15):

124–131(in Chinese).

收稿日期: 2022–09–06

作者简介:

陆文安 (1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统安全稳定分析与控制, E-mail: 211306080026@hhu.edu.cn;

吴许晗 (1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为研究方向为电力系统次同步振荡分析与抑制, E-mail: 448921644@qq.com;

余一平 (1977), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为电力系统宽频振荡监测溯源、新型电力系统动态安全分析与抑制, E-mail: yyiping@hhu.edu.cn;

李兆伟 (1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制, E-mail: lizhaowei@sgepri.sgcc.com.cn;

郅朝辉 (1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析, E-mail: qiezhaohui@sgepri.sgcc.com.cn;

李甘 (1983), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划及可靠性, E-mail: yml0126@163.com。