

基于执行依赖启发式动态规划的风电场电压协调控制

薛尚青, 蔡金锭

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 提出了一种变速恒频双馈电机风电场与静止同步补偿器的电压协调控制方法。介绍了执行依赖启发式动态规划(ADHDP)方法的原理, 设计了基于ADHDP的电压协调控制器, 控制器以风电场送端母线电压偏差为输入, 采用神经网络模型构造执行网络和评价网络, 通过最小化评价网络输出的代价函数来决定执行网络产生双馈风电场与静止同步补偿器的附加电压指令值。对不同风速、故障程度的各种故障情形进行仿真, 仿真结果表明, ADHDP控制器可起到附加阻尼控制作用, 能够协调双馈风电场与静止同步补偿器支撑电网电压, 并对故障后的电压振荡有良好的抑制能力, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 风电场; 静止同步补偿器; 执行依赖启发式动态规划; 电压控制

中图分类号: TM 614; TM 761+.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.021

0 引言

随着风电的迅速发展, 并网风电场与电网之间的相互影响越来越大。无功电压问题是广受关注的问题之一^[1]。风电场一般位于电网的末端, 具有快速、先进电压控制的风电场对维持输电系统电压水平和提高电压稳定性起到良好的作用^[2]。

通过控制电网中的无功功率可以对电网电压进行调整控制^[3-4]。由双馈风电机组组成的风电场作为重要的无功源, 众多文献已就此展开深入广泛的研究。文献[1]提出分层分布构架的风电场无功电压控制策略, 根据风电场并网点电压偏差量确定风电场无功需求, 并以等功率因数方式分配到各个机组; 文献[2]通过风电场无功功率调节控制并网点升压变低压侧电压以达到调节高压侧母线电压的目的; 文献[3]探讨了如何有效发挥双馈发电机组自身的无功调节能力, 提出了风电场无功功率控制策略。文献[1-3]仅研究风电场自身无功调节对电压的支撑, 而未考虑风电场配置的无功补偿单元参与无功调节起到的作用。文献[5]引入静止同步补偿器配合双馈风电场解决无功波动及低电压穿越问题。

本文针对双馈风电场与静止同步补偿器 STATCOM (STATic synchronous COMPensator) 间的协调控制问题进行研究, 提出了基于执行依赖启发式动态规划 ADHDP (Action-Dependent Heuristic Dynamic Programming) 的电压协调控制策略, 利用 ADHDP 控制器协调双馈风电场与 STATCOM 提供无功功率以维持支撑电网电压, 通过不同风速、故障程度下的各种故障仿真算例验证了所提方法的有效性。

1 ADHDP

1.1 动态规划基本思想

假设非线性(时变)离散系统状态方程^[6]:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统 n 维状态矢量; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 为 m 维控制矢量; $\mathbf{F}$ 为 n 维矢量函数; $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

与该系统关联的性能泛函为:

$$J(\mathbf{x}(0)) = \sum_{k=0}^{N-1} \gamma^k U(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (2)$$

其中, γ 为折扣因子, $0 < \gamma < 1$; $U(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$ 为效用函数。

动态规划的核心是贝尔曼最优性原理, 它要求逐段作出决策, 选择最优控制, 完成从初始状态到终端状态的转移, 并使相应段后部子过程的性能函数为极小值, 换言之, 无论过去的状态和决策如何, 对于前部的决策形成的当前状态而言, 余下的各个决策必定构成最优策略^[7]。

根据贝尔曼最优性原理, 动态规划递推方程可描述为^[8]:

$$J_{N-k}^*(\mathbf{x}(k)) = \min [U(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \gamma J_{N-(k+1)}^*(\mathbf{x}(k+1))] \quad (3)$$

其中, $J_{N-k}^*(\mathbf{x}(k))$ 为以 $\mathbf{x}(k)$ 为初始状态的后部 $N-k$ 段子过程的最优性能函数, $J_{N-(k+1)}^*(\mathbf{x}(k+1))$ 为以式(1)为初始状态的后部 $N-(k+1)$ 段子过程的最优性能函数。

经典动态规划将多阶段过程转化为一系列单阶段问题, 逐个求解, 但随着状态变量维数的增加, 问题求解难度会按维数规模呈幂级数增加, 带来“维数灾”问题^[9]。

1.2 ADHDP 原理

Werbos 等提出了自适应评价设计 ACD (Adaptive Critic Design)^[10-11], 它集神经网络、近似动态规划 ADP (Approximate Dynamic Programming) 和强化学习 RL (Reinforcement Learning) 于一体^[12], 是一类可以在线通过与系统的相互作用而不断改善控制效果的方法^[9]。

执行依赖启发式动态规划是 ACD 的一种,由评价网络和执行网络组成^[13],其原理如图 1 所示。

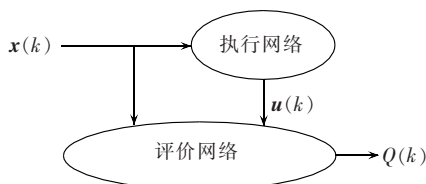


图 1 ADHDP 原理框图

Fig.1 Schematic diagram of ADHDP

定义评价网络最小化目标函数^[7,13]:

$$E_c(k) = \frac{1}{2} e_c^2(k) = \frac{1}{2} [Q(k-1) - U(k) - \gamma Q(k)]^2 \quad (4)$$

对任意的 k_0 , 当 $E_c(k_0) = 0$ 时, 由式(4)可得:

$$\begin{aligned} Q(k_0-1) &= U(k_0) + \gamma Q(k_0) = U(k_0) + \\ &\gamma [U(k_0+1) + \gamma Q(k_0+1)] = \dots = \\ &\sum_{k=k_0}^{\infty} \gamma^{k-k_0} U(k) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)与式(2)的系统性能泛函相同, 且满足:

$$Q(k) \approx J(k+1) \quad (6)$$

因此, 通过调整评价网络权值来构造代价函数 $Q(k)$, 调整执行网络权值来最小化 $Q(k)$ 即可得到一系列次优的控制序列 u^* , 这样也在一定程度上解决了“维数灾”的问题。

2 ADHDP 控制器设计

本文设计 ADHDP 控制器, 用于实现双馈风电场与 STATCOM 间的电压协调控制, ADHDP 控制器原理如图 2 所示。

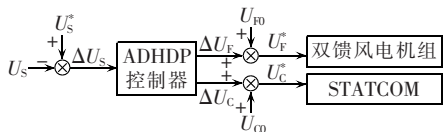


图 2 ADHDP 控制器原理

Fig.2 Schematic diagram of ADHDP controller

图 2 中, 双馈电机转子侧变换器和 STATCOM 均采用电压控制模式。ADHDP 控制器的输入为风电场送端母线电压值 U_s (标么值) 与设定值 U_s^* 的偏差量 ΔU_s , 输出为双馈风电机组附加电压信号 ΔU_F 及 STATCOM 附加电压信号 ΔU_C , ΔU_F 、 ΔU_C 分别与设定的稳态电压参考值 U_{F0} 、 U_{C0} 叠加, 作为输入双馈风电机组与 STATCOM 的电压指令信号 U_F^* 和 U_C^* 。

2.1 评价网络

评价网络采用 5-20-1 的 3 层 BP 神经网络结构, 隐层使用 S 型函数, 输出层使用线性函数, 输入为状态参数 $x(k) = \{\Delta U_s(k), \Delta U_s(k-1), \Delta U_s(k-2)\}$ 和控制量 $u(k) = \{\Delta U_F(k), \Delta U_C(k)\}$, 输出为代价函数 $Q(k)$ 。

ADHDP 控制器的目的是通过协调控制减小风电场送端母线电压偏差, 因此, 效用函数定义为:

$$U(k) = 0.01 [6\Delta U_s^2(k) + 3\Delta U_s^2(k-1) + \Delta U_s^2(k-2)] \quad (7)$$

评价网络采用 forward-in-time^[6,13]训练方法, 即在时刻 $k-1$ 训练, 期望输出目标由 $\gamma Q(k) + U(k)$ 给定, 实现映射:

$$\begin{Bmatrix} x(k-1) \\ u(k-1) \end{Bmatrix} \rightarrow \{\gamma Q(k) + U(k)\} \quad (8)$$

评价网络的训练过程见图 3。评价网络最小化目标函数如式(4)所示, 采用梯度下降法更新评价网络权值^[14]:

$$\Delta W_c = -l_c \frac{\partial E_c}{\partial W_c} = -l_c \frac{\partial E_c}{\partial e_c} \frac{\partial e_c}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial W_c} = -l_c e_c \frac{\partial Q}{\partial W_c} \quad (9)$$

其中, l_c 为评价网络学习率, W_c 为评价网络各层间的连接权值。

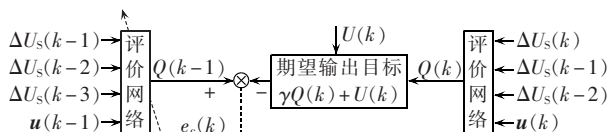


图 3 评价网络的训练过程

Fig.3 Training process of evaluation network

2.2 执行网络

执行网络采用 3-20-2 的 3 层 BP 神经网络结构, 隐层和输出层均采用 S 型函数, 输入为状态参数 $x(k) = \{\Delta U_s(k), \Delta U_s(k-1), \Delta U_s(k-2)\}$, 输出为控制量 $u(k) = \{\Delta U_F(k), \Delta U_C(k)\}$ 。

执行网络的训练目标是 minimize 评价网络输出的代价函数 $Q(k)$, 定义其最小化目标函数为:

$$E_a(k) = \frac{1}{2} e_a^2(k) = \frac{1}{2} Q^2(k) \quad (10)$$

执行网络的权值更新采用梯度下降法^[14]:

$$\Delta W_a = -l_a \frac{\partial E_a}{\partial W_a} = -l_a \frac{\partial E_a}{\partial e_a} \frac{\partial e_a}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial W_a} = -l_a e_a \frac{\partial Q}{\partial W_a} \quad (11)$$

其中, l_a 为执行网络学习率, W_a 为执行网络各层间的连接权值。

执行网络的训练过程如图 4 所示, 代价函数 $Q(k)$ 误差信号经评价网络反向传播。

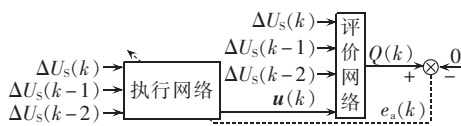


图 4 执行网络的训练过程

Fig.4 Training process of execution network

3 仿真研究

3.1 仿真系统

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真系统以验证所设计 ADHDP 控制器的正确性和有效性。如图 5 所示, 仿真系统为双馈型风电场并网运行模型,

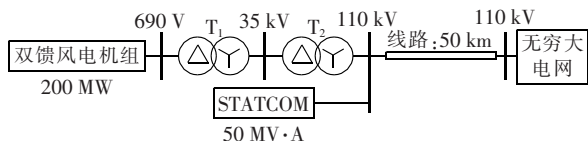


图 5 仿真系统

Fig.5 Simulation system

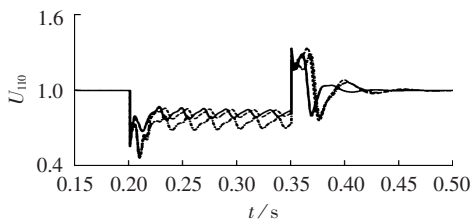
风电场总装机容量 200 MW, 包含 100 台单机容量 2 MW 的双馈风电机组, 机组由机端升压变 T_1 升压到 35 kV, 再经过 T_2 升压到 110 kV, 通过 50 km、110 kV 线路并入无穷大电网。风电场送端 110 kV 母线接有容量为 50 MV·A 的 STATCOM。在系统大扰动故障情况下, 把风电场当作一个整体来简化计算过程对于结论并不会产生很大的误差^[15-16], 因此本文以单台等容量风电机组模型代替整个风电场进行仿真研究。

稳态时, 双馈风电机组和 STATCOM 的电压参考值设定为 1.0 p.u., 网侧变换器采用无功控制模式, 无功参考值设为 0。ADHDP 控制器实现的采样周期为 1 ms。假定无穷大电网在 $t=0.2$ s 时发生三相跌落故障, 150 ms 后故障恢复。对不同风速、故障程度下的各种故障情形进行仿真研究, 同时将本文所提 ADHDP 协调控制(方法 1)、无 ADHDP 协调控制(方法 2)、双馈风电场单独控制(方法 3)作比较, 以验证本文所提方法的有效性。当双馈风电场单独控制时, STATCOM 采用无功控制模式, 其输出设为 0。

3.2 不同风速下的故障仿真

跌落幅值为 0.5 p.u., 风速分别为 5 m/s、10 m/s、14 m/s 时, 分别采用 3 种方法的风电场送端 110 kV 母线电压 U_{110} (标么值)控制效果对比如图 6 所示。

由图 6 可知, 在故障清除后的电压恢复过程中, ADHDP 协调控制方法起到附加阻尼作用, 缩短了电压振荡时间。在低风速区(见图 6(a)), 双馈风电场无功发生能力强, 调节范围大, 其单独控制的效果最好, 而方法 2 的控制效果最差; 方法 1 控制效果虽不



(c) 跌落幅值 0.5 p.u., 风速 14 m/s

——方法 1,方法 2,方法 3

图 6 不同风速下母线电压 U_{110} 控制效果对比Fig.6 Comparison of control effectiveness for U_{110} among different wind speeds

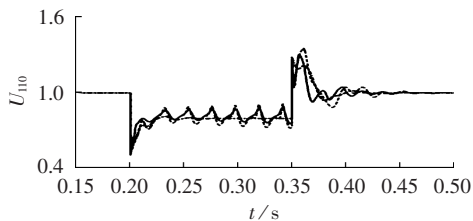
如方法 3, 但电压的振荡衰减速度最快。在高风速区(见图 6(b)和图 6(c)), 方法 1 的电压超调量较小, 其最大值出现的时刻也较早, 而且调整时间也至少快 1 个周期; 方法 2 和方法 3 的控制效果基本一样, 但方法 3 稍优于方法 2, 这是由于双馈风电场与 STATCOM 间无协调控制时, 两者间相互干扰导致的结果, 而对比方法 1 和方法 3 的电压控制效果, 可明显看出采用 ADHDP 协调控制方法的优越性。

在故障时间段内, STATCOM 参与无功电压控制时, 电压幅值曲线位于方法 3 之上, 有利于对电网电压的支撑, 但会引起与双馈风电场之间的振荡(见图 6(a))。在高风速区, 双馈风电场无功调节范围随着有功输出增大而减小, 降低了对电压的无功支撑能力, 导致电压出现振荡。

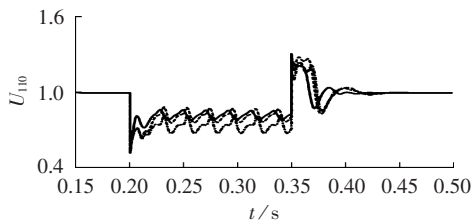
3.3 不同故障程度仿真分析

风速为 8 m/s, 跌落幅值分别为 1 p.u.、0.5 p.u.、0.2 p.u.时, 分别采用 3 种方法的风电场送端 110 kV 母线电压 U_{110} (标么值)控制效果对比如图 7 所示。

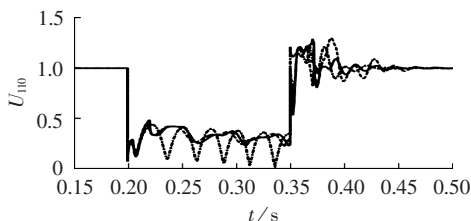
电网发生幅值为 0.5 p.u.或 1 p.u.跌落故障时, 因无法获得足够的无功支撑而发生振荡, 如图 7(a)和图 7(b)所示, 故障期间, 方法 1 能较好地协调双馈风电场与 STATCOM 提供无功支撑电网电压并抑制电压振荡。故障清除后, 如图 7(a), 电压出现较大



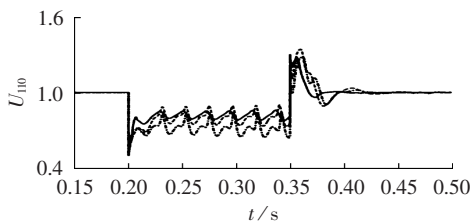
(a) 跌落幅值 0.5 p.u., 风速 5 m/s



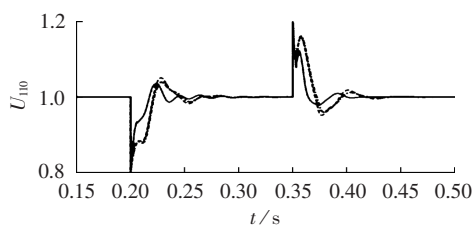
(b) 跌落幅值 0.5 p.u., 风速 10 m/s



(a) 风速 8 m/s, 跌落幅值 1 p.u.



(b) 风速 8 m/s, 跌落幅值 0.5 p.u.



(c) 风速 8 m/s, 跌落幅值 0.2 p.u.

— 方法 1, ---- 方法 2, 方法 3

图 7 不同故障程度下母线电压 U_{110} 控制效果对比Fig.7 Comparison of control effectiveness for U_{110} among different voltage sags

较长时间的振荡,方法 1 的电压调整时间比方法 3 长,但其对电压振荡的抑制能力更强;对比方法 2 可知,方法 1 电压最大值出现在约 0.37 s 处,比方法 2 快约 1 个周期。如图 7(b),方法 1 的电压恢复过程时间约为 30 ms,而方法 2 和方法 3 约需 70 ms。

当电压跌落幅值为 0.2 p.u.时,风电场具有足够的无功输出能力,电网电压经振荡后维持在 1 p.u.,如图 7(c)所示。故障过程中,方法 1 能在 1 个周期时间内将电压维持在 $\pm 5\%$ 以内;在电压恢复过程中,方法 1 的电压振荡最大值为 1.12 p.u.,而方法 2、方法 3 的最大值为 1.16 p.u.,且其电压振荡衰减时间也提前约半个周期。

4 结论

依据动态规划思想,设计了基于 ADHDP 方法的双馈风电场与 STATCOM 间的电压协调控制器。ADHDP 控制器在不同风速、故障程度的各种故障情形中的仿真表明,ADHDP 控制器起到了外部附加阻尼控制作用,缩短了电压振荡时间,能够协调双馈风电场与 STATCOM 提供无功支撑电网电压并对电压波动及电压恢复过程中的电压振荡有良好的抑制能力。ADHDP 控制方法充分发挥了双馈风电场与 STATCOM 的无功处理能力,可以缓解电网的无功压力,有效提高了风电场故障穿越能力。

参考文献:

- [1] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):83-88.
WANG Songyan,ZHU Lingzhi,CHEN Ning,et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(13):83-88.
- [2] 曹军,张榕林,林国庆,等. 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(4):87-91.
CAO Jun,ZHANG Ronglin,LIN Guoqing,et al. A voltage control strategy for wind farms using doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(4):87-91.
- [3] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.

- LANG Yongqiang,ZHANG Xueguang,XU Dianguo,et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):77-82.
- [4] 程浩忠,吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[J]. 北京:中国电力出版社,2004:22-31.
- [5] 王成福,梁军,冯江霞,等. 故障时刻风电系统无功电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):14-17.
WANG Chengfu,LIANG Jun,FENG Jiangxia,et al. Coordinated var-voltage control during fault of wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):14-17.
- [6] SONG Shaojian,HE Yi,LIN Xiaofeng,et al. On ADHDP-based optimization control for STATCOM[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing,China:[s.n.],2010:1570-1575.
- [7] 张志刚,马光文,王黎. 基于启发式动态规划方法的发电商最优竞价策略[J]. 电网技术,2009,33(11):71-75.
ZHANG Zhigang,MA Guangwen,WANG Li. Optimal bidding strategy of generation companies based on heuristic dynamic programming[J]. Power System Technology,2009,33(11):71-75.
- [8] 刘豹,唐万生. 现代控制理论[M]. 北京:机械工业出版社,2006:282-283.
- [9] 林小峰,喻亮,宋绍剑,等. 自适应评价设计的执行依赖方法[J]. 控制工程,2008,15(4):423-425,465.
LIN Xiaofeng,YU Liang,SONG Shaojian,et al. Action-dependent methods of adaptive critic design[J]. Control Engineering of China, 2008,15(4):423-425,465.
- [10] PROKHOROV D V,WUNSCH D C. Adaptive critic designs[J]. IEEE Trans on Neural Networks,1997,8(5):997-1007.
- [11] QIAO Wei,HARLEY R G,VENAYAGAMOORTHY G K. Coordinated reactive power control of a large wind farm and a STATCOM using heuristic dynamic programming[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2009,24(2):493-503.
- [12] 林小峰,王锦. 执行依赖启发式动态规划在同步发电机励磁系统中的应用[J]. 电气自动化,2011,33(2):20-22.
LIN Xiaofeng,WANG Jin. The application of action dependent heuristic dynamic programming in excitation system of synchronous generator[J]. Electrical Automation,2011,33(2):20-22.
- [13] LIU D,XIONG X,ZHANG Y. Action-dependent adaptive critic designs [C]//Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Washington D C,USA:IEEE, 2001:990-995.
- [14] 林小峰,段松峰,杨宝生,等. 基于执行依赖启发式动态规划的预分解窑优化控制[J]. 科技通报,2010,26(5):681-686.
LIN Xiaofeng,DUAN Shuanfeng,YANG Baosheng,et al. Precalciner kiln optimal control based on action dependent heuristic dynamic programming[J]. Bulletin of Science and Technology, 2010,26(5):681-686.
- [15] AKHMATOV V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Copenhagen, Denmark:Technical University of Denmark,2003.
- [16] SLOOTWEG J G,HAAN S W H,POLINDER H,et al. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(1):144-151.

作者简介:

薛尚青(1986-),男,福建仙游人,博士研究生,从事电网优化运行和人工智能方法的研究(E-mail:xsq524906@qq.com);

蔡金锭(1954-),男,福建晋江人,教授,博士研究生导师,博士,从事人工智能技术在电力工程和电力电子故障诊断领域的应用研究。

(下转第 120 页 continued on page 120)

generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-73.

[14] JOHNSON G L. Wind energy systems[M]. Manhattan, KS, USA: Prentice-Hall, 2001: 59-62.

[15] WANG X, MAKIS V. Autoregressive model-based gear shaft fault diagnosis using the Kolmogorov-Smirnov test[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 327(3): 413-423.

[16] 腾素珍, 姜炳蔚, 任玉杰, 等. 数理统计[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996: 172-179.

[17] 吴俊, 李国杰, 孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 15-19.

WU Jun, LI Guojie, SUN Yuanzhang. Maximum injection power calculation of wind farms connected to power systems based on stochastic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31

(14): 15-19.

作者简介:

杨洪明(1972-), 女, 湖南望城人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统优化运行、分析与控制(E-mail: yhm5218@163.com);

王 爽(1982-), 男, 河南新乡人, 硕士, 研究方向为电力系统优化运行、分析与控制(E-mail: wangshuangzs@126.com);

易德鑫(1987-), 男, 湖南醴陵人, 硕士, 研究方向为电力系统优化运行、分析与控制(E-mail: yidexinzhang@163.com);

易 俊(1986-), 男, 湖南娄底人, 硕士, 研究方向为电力系统优化运行、分析与控制(E-mail: yijun0819@163.com);

刘党峰(1986-), 男, 河南濮阳人, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与电网供电管理。

Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation

YANG Hongming¹, WANG Shuang^{1,2}, YI Dexin¹, YI Jun¹, LIU Dangfeng³

(1. Engineering Research Center of Electric Power & Traffic Safety Monitoring & Control and Energy Conservation Technology of Ministry of Education, Hunan Provincial Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. Shishi Electric Power Limited Company, Quanzhou 362700, China; 3. Electricity Management Division of Central Oil Field, Puyang 457001, China)

Abstract: With the consideration of the tail-dependent correlation of multiple wind farm power outputs, their joint probability distribution is characterized by Gumbel-Copula function and a stochastic optimal dispatch model of power system with multiple wind farms is proposed. The chance constraint is managed by SAA (Sample Average Approximation) and the stochastic optimization is thus transformed to the computable and deterministic non-linear programming, which is then solved by PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm. The influence of joint probability distribution, chance constraint credit level and sample times on the results of optimal dispatch is analyzed by cases, which verifies the rationality of stochastic optimal dispatch based on Gumbel-Copula joint probability distribution.

Key words: stochastic optimal dispatch; multiple wind farms; power correlation; Gumbel-Copula; chance constraint; sample average approximation; wind power; models

(上接第 113 页 continued from page 113)

Coordinated voltage control based on action-dependent heuristic dynamic programming for wind farm

XUE Shangqing, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A control strategy is proposed to coordinate the voltage control between DFIG-based wind farm and STATCOM. The principle of ADHDP (Action-Dependent Heuristic Dynamic Programming) is described and a voltage coordination controller is designed based on it, which takes the sending bus voltage deviation of wind farm as its input and adopts neural network model to construct its execution network and evaluation network. The additional voltage reference sent to DFIG-based wind farm and STATCOM is generated by the execution network through minimizing the cost function outputted by the evaluation network. Simulation is carried out for different wind speeds and voltage sags, which shows that, the ADHDP-based controller, as a supplementary damping controller, coordinates the grid-voltage control between DFIG-based wind farm and STATCOM, and suppresses the post-fault grid-voltage oscillation, verifying the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind farms; STATCOM; action-dependent heuristic dynamic programming; voltage control