

基于功率平衡模型的高比例新能源接入 配电网电压波动耦合抑制方法

李仁杰, 梁骏[†], 丁亮

(国网安徽省电力有限公司 合肥供电公司, 安徽 合肥 230022)

摘 要:为改善高比例新能源接入配电网后产生的弃风弃光现象,设计了一种基于功率平衡模型的高比例新能源接入配电网电压波动耦合抑制方法。通过 LSTM 网络与高比例新能源接入配电网的历史数据实现风电与光伏的参数预测。构建高比例新能源接入配电网的功率平衡优化模型,平衡风电与光伏参数预测下的配电网功率。控制静止同步补偿器的驱动脉冲,实现电压波动耦合抑制。测试结果表明,在两相负荷不平衡的情况下,该方法在 0.02 s 内迅速实现了电压的稳定;在光伏输出波动且两相负载不平衡的情况下,该方法在 0.05 s 内实现了电压的稳定。

关键词:功率平衡模型;高比例新能源;电压波动耦合抑制;LSTM 网络

中图分类号:TM432

文献标识码:A

Coupling Suppression of Voltage Fluctuation in Distribution Network With High Proportion of New Energy Based on Power Balance Model

LI Renjie, LIANG Jun[†], DING Liang

(State Grid Anhui Electric Power Company Hefei Power Supply Company, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: To improve the phenomenon of wind and light abandonment caused by the high proportion of new energy connected to the distribution network, a coupling suppression method for voltage fluctuations in the high proportion of new energy connected to the distribution network based on a power balance model is designed. Realize parameter prediction of wind power and photovoltaic through LSTM network and historical data of high proportion new energy integration into the distribution network. Build a power balance optimization model for high proportion new energy integration into the distribution network, balancing the power of the distribution network under the prediction of wind and photovoltaic parameters. Control the driving pulse of the static synchronous compensator to achieve voltage fluctuation coupling suppression. The test results show that in the case of imbalanced two-phase loads, this method quickly achieves voltage stability within 0.02 s; In the case of fluctuating photovoltaic output and imbalanced two-phase loads, this method achieved voltage stability within 0.05 s.

Key words: power balance model; high proportion of new energy; voltage fluctuation coupling suppression; LSTM network

随着冰川消融、环境恶化等一系列问题的凸显,对各种新能源进行探索与发展,是各国实现可

持续发展的必然选择。近年来,全球风电与太阳能装机容量一直在持续增长,多个能源大国也纷纷对

未来的新能源发展蓝图进行描绘与规划^[1]。可以说,高比例新能源接入配电网是电力系统未来一种必然的、不可逆的发展趋势。目前,光伏与风电与已经成为我国重要的电源支柱。然而,由于高比例新能源的接入,配电网电压调节压力暴增,也带来了弃风弃光现象。特别是在风光资源比较富集的地区,弃风弃光率一直很高。究其原因,在配电网接入高比例新能源的场景下,配电网电压波动会更加剧烈,也限制了新能源的消纳。因此必须对配电网电压波动进行耦合抑制,才能缓解配电网电压调节压力,增强配电网调峰能力,减少弃风弃光现象。对于电压波动抑制的研究,各国都很重视,并提出了多种抑制方法。其中文献[2]中提出了 MMC 的电压波动抑制策略,可以缓解 MMC 子模块电容器的电压波动。文献[3]中提出了一种在电网电压不平衡情况下 MMC 子模块的电压波动抑制方法,有效性较高。

参考以上电压波动抑制方法的思路,设计基于功率平衡模型的电压波动耦合抑制方法。

1 高比例新能源接入配电网电压波动耦合抑制

1.1 风电与光伏的参数预测

通过 LSTM 网络与高比例新能源接入配电网的历史数据实现风电与光伏的参数预测。构建参数预测 LSTM 网络模型,模型由三层全连接层与两层 LSTM 层构成^[4]。全连接层每层神经元个数分别设置为 64 个、16 个和 1 个;LSTM 层每层神经元个数分别设置为 20 个和 24 个^[5]。选择的损失函数是平均绝对误差,具体公式如下:

$$F_{MAE}(x, \hat{x}) = \|x - \hat{x}\|_1 \quad (1)$$

式(1)中, x 是指模型中输入的历史数据; $\hat{x}$ 是指模型预测的风电或光伏参数; $F_{MAE}(x, \hat{x})$ 是指 x 与 $\hat{x}$ 的平均绝对误差。

采用辐射量数据对参数预测 LSTM 网络模型进行训练,获取一个 LSTM 网络,接着采用历史风速数据对参数预测 LSTM 网络模型进行训练,获取另一个 LSTM 网络^[6]。在两个 LSTM 网络中,分别输入前 24 小时的光辐射量与历史风速,获取光伏与风电的对应预测参数。

通过 LHS-CD 法对 LSTM 网络的训练样本进行采样。具体执行步骤如下。

(1)采样,具体步骤如下。

1. 利用概率密度函数,通过预测值求取光伏与

风电的累积分布函数。其中风电的预测误差计算公式如下:

$$c = M(\alpha, \beta^2) \quad (2)$$

式(2)中, c 是指风速的预测值; β 是指风速的标准差; α 是指风速的均值; $M(\cdot)$ 是指 Gaussian 分布^[7]。

光伏的预测误差计算公式如下:

$$d = N(\chi, \delta) \quad (3)$$

式(3)中, χ 是指光伏的均值; δ 是指光伏的预测误差; N 是指 Beta 分布^[8]。

2. 均分各累积分布函数的值域,使其被分为 A 个子区间,并对各子区间中点的随机变量值进行求取,获取 A 组初始样本 B 。

(2)排序,具体步骤如下。

1. 随机生成重排序号矩阵,用 T 来表示,根据 T 重排初始样本 B 的各行。

2. 对初始样本 B 的相关矩阵进行计算,用 F 来表示,对 F 实施 Cholesky 分解,获取下三角矩阵 W 。并对 T 元素的对应重要性矩阵进行计算,根据计算结果的大小对初始样本 B 进行重排。重排后的 B 即为维度间关联性降低后的样本^[9]。

在 LSTM 网络训练样本的采样中,需要对样本数 A 进行场景削减,具体步骤如下:

(1)输入 A 组采样值,具体如下式:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_A\} \quad (4)$$

式(4)中, b_A 是指第 A 个样本。

并将保留的样本定为 L 个。

(2)对场景间的实际相似度指标值进行计算,具体如下式:

$$D_{i,j} = \max \{1, \|\bar{\omega}_i - \bar{\omega}\|_2, \|\bar{\omega}_j - \bar{\omega}\|_2\} \|\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_j\|_2 \quad (5)$$

式(5)中, $\bar{\omega}_i$ 是指第 i 个场景的值; $\bar{\omega}$ 是指场景的均值; $\bar{\omega}_j$ 是指第 j 个场景的值; $\|\cdot\|_2$ 是指二范数^[10]。

(3)对于 b_i ,找到与其最相似的场景,用 b_{mi} 来表示。

(4)对各场景 b_i 的概率 p_i 进行考虑,对 b_i 相似度量所对应的期望值进行计算,具体公式如下:

$$K_i = p_i f_{i,mi} \quad (6)$$

式(6)中, $f_{i,mi}$ 是指 b_i 相似度量^[11]。

(5)对 K_i 最小值的变量值 u 进行计算,用 b_u 表示其对应场景。

(6)对 A 组采样值进行更新,具体如下式:

$$B'' = B - \{b_u\} \quad (7)$$

并对场景概率进行更新,具体如下式:

$$p_{mu}'' = p_{mu} + p_u \quad (8)$$

式(8)中, p_{mu} 是指原本的场景概率; p_u 是指 b_u 的概率。

(7)当剩余场景数是 L 时,输出 L 组采样值;当剩余场景数不是 L 时,重复以上步骤。

1.2 构建配电网功率平衡模型

基于功率平衡模型构建高比例新能源接入配电网的功率平衡优化模型,实现风电与光伏参数预测下的配电网功率平衡。搭建的配电网功率平衡优化模型的目标函数具体如下式:

$$V_{\min} = \sum_i Z_{gi}(Y_{gi}) + \sum_i Z_{dci} Y_{dci} + \sum_i Z_r(Y_{dci}) + \sum_i Z_l Y_l \quad (9)$$

式(9)中, $V_{\min}$ 是指配电网运行的最小综合代价; $Z_{gi}(Y_{gi})$ 是指对发电机有功出力进行调整的成本; $Z_r(Y_{dci})$ 是指紧急支援直流功率的成本; Z_{dci} 是指风电与光伏支援直流功率的经济成本; Y_{dci} 是指风电与光伏支援直流功率的变化量; Z_l 是指考虑安全性贡献的风电与光伏参数预测下的对应成本; Y_l 是指节点有功切负荷量^[12]。

为模型设置节点潮流约束条件,具体如下式:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 - P_4 + Y_l - \sum_{j=1}^J V_j (G_1 \cos \vartheta + B_1 \sin \vartheta) = 0 \\ Q_1 + Q_2 - Q_3 + r_1 + Y_l - \sum_{j=1}^J V_j (G_1 \cos \vartheta - B_1 \sin \vartheta) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, P_1 是指某节点上发电机对应有功功率; P_3 是指光伏有功功率; B_1 是指风电与光伏波动时的越限概率; r_1 是指节点越限概率; P_2 是指风电有功功率; G_1 是指支路有功功率; Q_1 是指某节点上发电机对应有功功率; Q_3 是指光伏无功功率; ϑ 是指两个节点的电压相角差; J 是指节点数; P_4 是指节点上的负荷有功功率; Q_2 是指风电无功功率; V_j 是指节点 j 的电压幅值^[13]。

就此完成高比例新能源接入配电网功率平衡优化模型的构建。

1.3 电压波动耦合抑制

根据功率平衡结果,利用静止同步补偿器实现电压波动耦合抑制。也就是通过控制静止同步补偿器的驱动脉冲来满足功率平衡结果下配电网需要的交流电压相位、频率以及大小。通过输入输出建模法构建静止同步补偿器的数学模型^[14]。在建模前首先做出如下假设。

(1)用等效电阻 R_1 表示静止同步补偿器的各

种导通电阻。

(2)忽略谐波分量,只对静止同步补偿器输出电压对应的基波分量进行考虑。

基于以上假设,静止同步补偿器变流器的总输出电压可以用下式来表示:

$$\begin{cases} u_1(z) = \zeta u_a \sin(\tau z - \nu) = \sqrt{2} U_1 \sin(\tau z - \nu) \\ u_2(z) = \zeta u_a \sin(\tau z - \frac{2\pi}{3} - \nu) = \sqrt{2} U_1 \sin(\tau z - \frac{2\pi}{3} - \nu) \\ u_3(z) = \zeta u_a \sin(\tau z + \frac{2\pi}{3} - \nu) = \sqrt{2} U_1 \sin(\tau z + \frac{2\pi}{3} - \nu) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, $u_1(z)$ 、 $u_2(z)$ 、 $u_3(z)$ 是指静止同步补偿器的三相电压; ζ 是指比例系数; u_a 是指桥式逆变器的运行电压; ν 表示同步信号采样点电压与静止同步补偿器输出电压的夹角; τ 代表静止同步补偿器输出电压对应的基波分量; U_1 表示连接变压器的运行电压^[15]。

同步信号采样点的三相电压可用下式来表示:

$$\begin{cases} u_{b1}(z) = \sqrt{2} U_2 \sin \tau z \\ u_{b2}(z) = \sqrt{2} U_2 \sin(\tau z - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{b3}(z) = \sqrt{2} U_2 \sin(\tau z + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, U_2 是指同步信号采样点的总电压。

则静止同步补偿器三相电压的数学方程可以用下式来表示:

$$\begin{cases} \gamma \frac{di_1(z)}{dz} = u_1(z) - u_{b1}(z) - R_1 i_1(z) \\ \gamma \frac{di_2(z)}{dz} = u_2(z) - u_{b2}(z) - R_1 i_2(z) \\ \gamma \frac{di_3(z)}{dz} = u_3(z) - u_{b3}(z) - R_1 i_3(z) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, $i_1(z)$ 、 $i_2(z)$ 、 $i_3(z)$ 是指静止同步补偿器的三相电压; γ 是指静止同步补偿器的能量参数^[16]。

就此完成静止同步补偿器数学模型的构建,在模型应用时,将其等效为相位、幅值均可以控制,并且与配电网频率一致的电压源,利用交流电抗器将静止同步补偿器连接到高比例新能源接入的配电网中,通过电流间接控制方式对其进行控制,实现配电网电压波动的耦合抑制。

2 案例测试

2.1 实验设计

对于设计的基于功率平衡模型的高比例新能

源接入配电网电压波动耦合抑制方法,在某新能源配电网中对其进行应用,并对其性能进行测试。实验配电网中接入了很高比例的光伏与风电,是一种两端配电型系统,内部有两种可控负荷。为实现新能源最大程度的利用,不考虑光伏与风电的调压能力,使新能源以最大功率运行。

实验配电网的结构如图 1 所示。

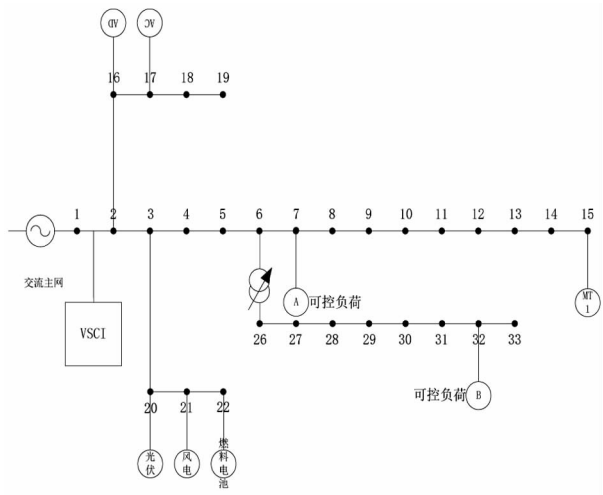


图 1 实验配电网的结构

利用设计方法对实验配电网进行电压波动耦合抑制,首先通过 LSTM 网络与实验配电网的历史数据实现该配电网风电与光伏的参数预测。在 Python 环境下通过 Keras 完成两个 LSTM 网络的搭建,网络训练方法采用 Adam,训练参数具体如下。

- ① 训练方式:分批训练;
- ② 各批训练样本数:128;
- ③ 重复训练轮数:90 轮;
- ④ 验证集与训练集的划分方式:十折交叉验证;
- ⑤ 训练硬件:GTX 1060 的显卡与 i7-8750H 的 CPU。

预测结果具体如图 2 所示。

接着构建高比例新能源接入配电网的功率平衡优化模型,最后利用静止同步补偿器实现电压波动耦合抑制。测试设计方法在不同情况下的电压波动耦合抑制结果,在测试中,将 MMC 的电压波动抑制策略与不平衡电网电压下的抑制方法作为对比方法,共同进行电压波动抑制性能测试,并分别用方法①、方法②来表示。

2.2 电压波动抑制性能测试结果

首先在两相负荷不平衡的情况下对三种方法的电压波动抑制结果进行测试,测试结果如图 3 所示。

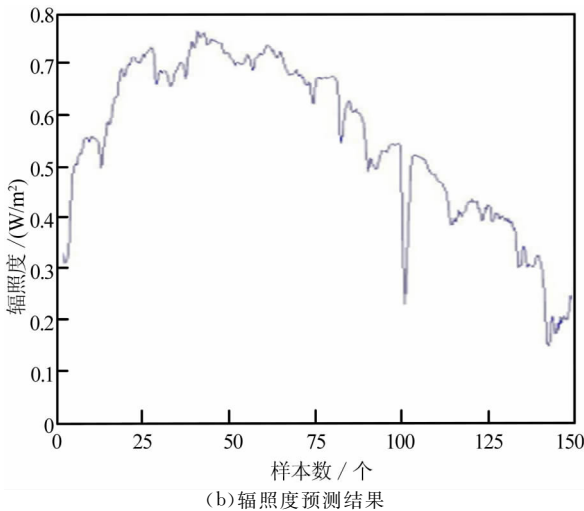
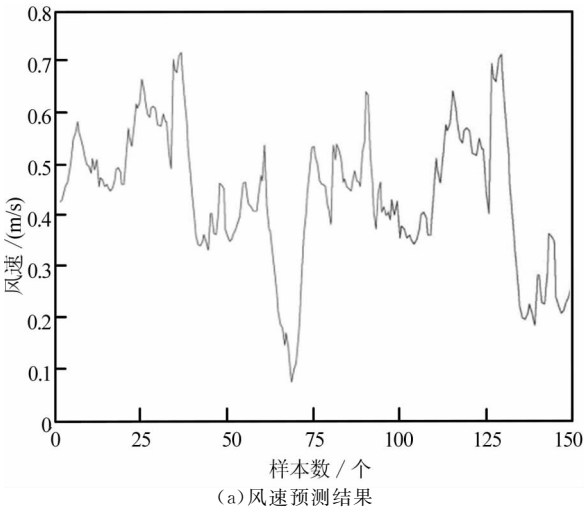


图 2 预测结果

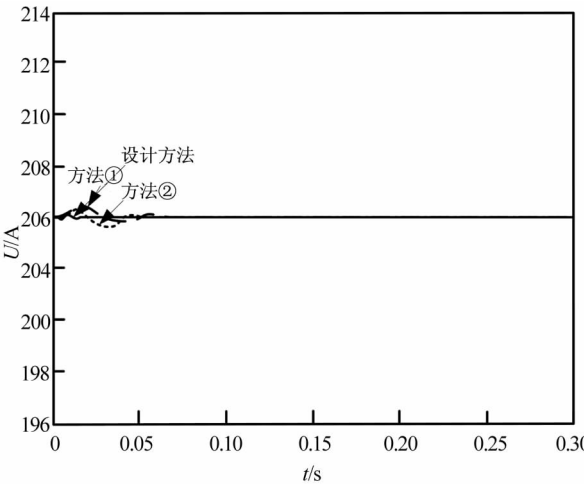


图 3 两相负荷不平衡情况下的测试结果

根据图 3 测试结果,在两相负荷不平衡的情况下,设计方法在 0.02 s 内迅速实现了电压的稳定,而方法①、方法②则花费了相对较长的时间才实现了电压的稳定,说明设计方法的电压波动抑制速度

更快。

接着在光伏输出波动且两相负载不平衡的情况下对三种方法的电压波动抑制结果进行测试,测试结果如图 4 所示。

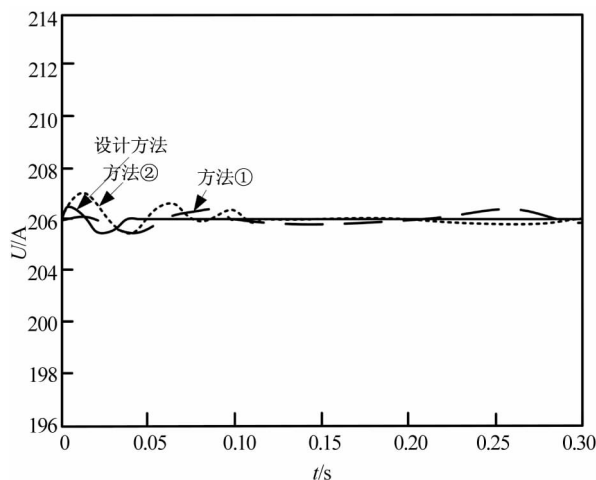


图 4 光伏输出波动且两相负载不平衡情况下的测试结果

根据图 4 测试结果,在光伏输出波动且两相负载不平衡的情况下,设计方法在 0.05 s 内实现了电压的稳定,而方法①、方法②则花费了很长时间才实现了比较稳定的电压,但仍有一定波动,说明设计方法的电压波动抑制性能更好。

3 结 论

在配电网中接入高比例的风电与光伏后,其电压波动会急剧加重,设计一种基于功率平衡模型的电压波动耦合抑制方法,实现了电压波动的迅速抑制,并且表现出了出色的电压稳定性能,取得了一定的研究成果。

参考文献

[1] 张天策,王剑晓,李庚银,等.面向高比例新能源接入的配电网电压时空分布感知方法[J].电力系统自动化,2021,45(2):37—45.

[2] 曹以龙,景旭川,景晓娟,等.注入共模电压与环流的 MMC 电压波动抑制策略[J].电力电子技术,2021,55(8):93—97.

[3] 李钰,陆锋,樊强,等.不平衡电网电压下的 MMC 子模块电压波动抑制方法[J].电力系统自动化,2020,44(4):91—100.

[4] 朱晓荣,陈朝迁.基于可控负荷与蓄电池储能的直流配电网电压波动抑制[J].电力自动化设备,2020,40(8):104—113.

[5] 张松枝.基于季节负荷差异性的区域综合能源系统模型[J].系统仿真学报,2021,33(3):562—571.

[6] 廖自力,疏歆,高强,等.电传动装甲车辆母线电压双通道补偿控制[J].兵工学报,2021,42(10):2082—2091.

[7] 李建林,赵文鼎,梁忠豪,等.光储一体化耦合制氢系统控制策略及仿真分析[J].热力发电,2022,51(11):148—155.

[8] 杨苓,许家浩,陈思哲,等.弱电网下三相并网系统自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6995—7007.

[9] 朱璐,王杉,刘俊翔,等.500 kV 高耦合分裂电抗限流器过电压抑制方法研究[J].高压电器,2021,57(11):108—115+123.

[10] 滕甲训,赵巍,潘禹卓,等.基于开关电容结构的 MMC 子模块波动功率耦合方案及其参数约束[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7449—7464.

[11] 闫荣格,董正予,焦佩林,等.基于振动分析的变压器铁心故障诊断[J].电工电能新技术,2021,40(1):55—60.

[12] 李姝玉,于弘洋,葛菁,等.双端口矩阵变换器在工/低频电网互联下的电容及电压波动特性分析[J].电网技术,2020,44(4):1437—1444.

[13] 涂春鸣,卢柏桦,郭祺,等.基于最小能量补偿法的串联电容耦合型动态电压恢复器运行特性分析[J].电工技术学报,2020,35(17):3727—3738.

[14] 付华,韩永新,王久阳. MMC 型换流器电容电压波动抑制方法研究[J].控制工程,2022,29(9):1566—1572+1579.

[15] 邓伟成,陆锋,许建中.混合 MMC 子模块电容电压波动耦合抑制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(5):30—38+55.

[16] 文武松,赵争鸣,聂金铜,等.基于系统功率平衡的电力电子变压器中双有源桥二次侧母线电压波动抑制策略[J].电网技术,2020,44(8):2971—2978.