ICS 国际标准分类号
CCS 中国标准文献分类号

团　　体　　标　　准

T/CES XXX—XXXX

分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估导则

Guidelines for simulation-based evaluation of power quality in distribution networks with distributed resources and energy storage

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布　　XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会　发布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求 2
5　评估流程 3
6　评估指标 4
7　数据要求 4
7.1　电网数据 4
7.2　设备数据 4
7.3　运行数据 4
7.4　气象与环境数据 4
8　电磁暂态建模仿真要求 ..... 错误！未定义书签。
8.1　电网模型 5
8.2　分布式电源模型 5
8.3　储能电站模型 5
9　指标计算方法 5
9.1　通用要求 ..... 错误！未定义书签。
9.2　供电电压偏差 ..... 错误！未定义书签。
9.3　电压波动 6
9.4　闪变 6
9.5　谐波 6
9.6　电压不平衡度 7
9.7　频率偏差 7
10　评估结果 7
附录 A（资料性）　光伏发电系统电磁暂态仿真模型典型结构 8
附录 B（资料性）　直驱风机电磁暂态仿真模型典型结构 12
附录 C（资料性）　双馈风机电磁暂态模型 16
附录 D（资料性）　电化学储能电站电磁暂态仿真模型典型结构 18
附录 E（资料性）　基于电磁暂态仿真的分布式光伏接入配电网电能质量预测评估案例 19
附录 F（资料性）　分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估报告 23

前　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出并归口。

本文件起草单位：广东电网有限责任公司汕头供电局、清华四川能源互联网研究院、清鸾科技(成都)有限公司、南方电网数字电网科技（广东）有限公司。

本文件主要起草人：陈昕、王玉姬、徐伟生、周哲玲、宋炎侃、艾鹏、雷伟刚、董晓殷、林汉武。

本文件为首次发布。

分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估导则

1 范围

本文件规定了分布式电源和储能接入配电网仿真评估的总体要求、评估流程、评价指标、数据要求、电磁暂态建模仿真要求、指标计算方法、评价结果等。

本文件适用于通过 35kV 及以下电压等级并网的风电场、光伏电站及储能电站的电能质量电磁暂态仿真评估计算，用于评估风电场、光伏电站及储能电站接入后对系统电能质量影响。对于 10kV 及以下公用电网，容量小于 6MVA 的三相屋顶光伏，可参照 T/CPSS 1003-2025 进行预测评估简化计算；当采用本文件进行评估时，以本文件的方法与结论为准。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差
GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变
GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡
GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
GB/T 19963 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分：陆上风电
GB/T 32826 光伏发电系统建模导则
GB/T 42716 电化学储能电站建模导则
DL/T 1208 电能质量评估技术导则 供电电压偏差
DL/T 1724 电能质量评估技术导则 电压波动和闪变
T/CPSS 1003屋顶光伏接入公用电网电能质量预测评估技术规范
IEC 61000-4-15 电磁兼容 试验和测量技术 闪变仪-功能和实际规范
IEC 61000-4-30 电磁兼容性(EMC) 第 4-30 部分：测试和测量技术.电能质量测量方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

公共连接点 point of common coupling（PCC）

电力系统中一个以上用户的连接处。

3.2

分布式电源 distributed resources

接入 35kV 及以下电压等级电网、在 35kV 及以下电压等级就地消纳为主的电源，包括风电场和光伏电站。

3.3

风电场 wind farm

由一批风电机组（包括机组单元变压器）、汇集线路、主升压变压器及其他设备组成的发电站。

3.4

光伏电站 photovoltaic power station

由多个光伏发电单元、直流汇集箱、汇集线路、主升压变压器及其他设备组成的发电站。

3.5

储能电站 energy storage power station

由多个储能发电单元（包括储能发电单元变压器）、汇集线路、主升压变压器及其他设备组成的发电站。

3.6

频率偏差 frequency deviation

系统频率的实际值和标称值之差。

3.7

电压偏差 voltage deviation

实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值，以百分数表示。

3.8

电压波动 voltage fluctuation

电压方均根值(有效值)一系列的变动或连续的改变。

3.9

闪变 flicker

灯光照度不稳定造成的视感。

3.10

电压不平衡 voltage unbalance

三相电压在幅值上不同或相位差不是 120°，或兼而有之。

3.11

不平衡度 unbalance factor

指三相电力系统中三相不平衡的程度。用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的方均根值百分比表示。

3.12

谐波 harmonic

对周期性交流量进行傅立叶级数分解，得到频率为基波频率大于 1 整数倍的分量。

3.13

电磁暂态仿真模型 Electromagnetic simulation model

用于电力系统电磁暂态过程仿真的模型，主要反映电力系统各元件从微秒到数秒之间的动态特性。

4 总体要求

a） 分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估要求在公共并网点进行；

b） 电磁暂态仿真评估应基于待评估电网现状和规划，在评估区域内建立包含电网、分布式电源及储能的全电磁暂态仿真模型。模型的建立应符合广泛使用的电磁暂态仿真软件及其数据格式规范；

c） 电磁暂态仿真评估宜基于电磁暂态仿真模型，获得覆盖评估统计时间的电能质量指标时间序列，并与相关标准限值进行比较。仿真可采用连续仿真或分段仿真等方式，具体实现方式可根据系统规模、模型复杂度和计算资源条件确定；

d） 电磁暂态仿真评估宜分别在配电系统正常运行的最大负荷方式和最小负荷方式下进行；

e） 电磁暂态仿真步长及采样频率应满足各项电能质量指标计算要求；

f） 分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估要求在公共并网点进行；

g） 电磁暂态仿真模型应覆盖对 PCC 点电能质量指标产生非忽略影响的电网与设备，至少包括：PCC 所在站的全部一次设备、同母线相邻馈线、站内无功/调压装置、PCC 与上一级母线之间的主变及相关设备、拟并网与既有分布式电源、储能及其集电/升压系统；

h） 上级电网可显式建模或采用戴维南/诺顿等值，当采用等值时，需注明等值参数来源；

i） 储能电站的电磁暂态仿真模型应反映其运行模式及控制策略，并考虑控制策略对电能质量指标的影响。

注 1：评估过程中，应考虑分布式电源受到的气象条件影响，包括季节性变化、光照强度和风速波动等，以确保评估结果的准确性和全面性。

注 2：分布式电源和储能仿真模型宜优先采用经过运行数据校核的厂家模型；当无法获得符合相应建模导则的详细模型时，可采用通用或黑盒模型，并通过资料或量测辨识关键参数，说明模型假设与适用范围。

5 评估流程

分布式电源和储能接入配电网电能质量电磁暂态仿真评估的主要流程见图 1。

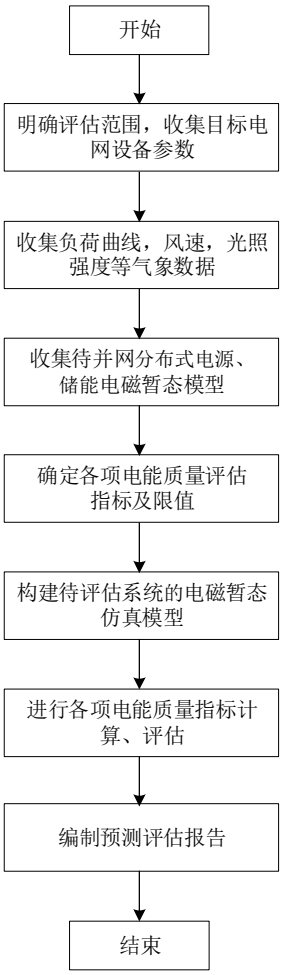


图1 分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估导则

分布式电源和储能接入配电网电能质量电磁暂态仿真评估流程具体步骤如下：

a） 明确待评估电网范围，收集架空线、电缆、变压器、上级电网等值参数、本地已建分布式电源和储能的电气参数及控制策略，包括额定电压、额定容量等；

b） 在待评估电网各典型气象条件下的最大负荷方式和最小负荷方式下，收集负荷不少于 24 h 的有功功率、无功功率曲线，以及风电场/光伏电站站址的风速、光照强度等气象数据信息；

c） 收集拟并网分布式电源和储能的详细电磁暂态仿真模型；当仅可提供通用或黑盒模型时，应提供关键参数范围或量测/ 试验资料用于辨识与校核；

d） 确定分布式电源和储能并网点和评估指标限值；

e） 在电磁暂态仿真软件中建立待评估电网、分布式电源和储能的电磁暂态仿真模型，并在系统各典型气象条件下最大负荷方式和最小负荷方式下，通过电磁暂态仿真获得覆盖评估统计时间的电能质量指标时间序列。仿真可按代表性运行时间段分段进行，每段仿真时间应满足相应电能质量指标计算所需的最小观测时间；

f） 根据电磁暂态仿真结果提取分布式电源和储能并网点的电能质量评估指标，并与相关限值进行比较；

g） 编制预测评估报告。

6 评估指标

分布式电源和储能接入配电网电能质量电磁暂态仿真评估的主要指标如下：

a） 供电电压偏差；
b） 电压波动；
c） 闪变；
d） 谐波；
e） 电压不平衡度；
f） 频率偏差。

7 数据要求

7.1 电网数据

电网数据应至少包括以下内容：

a） 目标电网主干网架拓扑图、相序与接地方式、系统侧等值阻抗图、各级母线短路容量表；
b） 线路/电缆元件的正序、零序阻抗及导纳参数。

7.2 设备数据

设备数据应至少包括以下内容：

a） 变压器：额定容量、原/副边额定电压、绕组连接类型、正序漏阻抗、励磁电导、分接头信息等；
b） 分布式电源：发电单元模型、站内集电升压系统模型、控制系统模型等；
c） 储能电站：电化学储能系统模型、站内集电升压系统模型、控制系统模型等；
d） 负荷：额定电压、额定容量，功率因数，额定频率，负荷类型等。

7.3 运行数据

运行数据应至少包括以下内容：

a） 待评估点的运行电压、频率（可用于边界条件设定与模型校核），数据采集周期宜不少于 24 小时；
b） 配变负载侧有功功率、无功功率、电压、电流，数据采集周期宜不少于 24 小时；
c） 分布式电源出力曲线数据，数据采集周期宜不少于 24 小时。

7.4 气象与环境数据

气象与环境数据应至少包括以下内容：

a） 风电场/光伏电站站址的环境温度、太阳辐射强度，数据采集周期宜不少于 24 小时；
b） 风电场/光伏电站站址距地面 10 米处及 50 米处风速等，数据采集周期宜不少于 24 小时。

注 1：运行数据及气象环境数据均需要在待评估电网最大负荷方式和最小负荷方式进行采集。

注 2：运行数据及气象环境数据的采样间隔应满足仿真分段工况构建与指标统计需要；评估时间段宜与数据采样间隔保持一致或为其整数倍。

注 3：运行数据及气象环境数据宜采用带时间戳的时序数据，时间基准应统一。

注 4：当采用现场电能质量监测数据或测量结果用于模型校核/对比验证时，其测量与统计方法应符合 IEC 61000-4-30 的规定。

8 电磁暂态建模仿真要求

电磁暂态模型应覆盖评估区域内的传输线/电缆、变压器、母线及接地、无功补偿与调压装置、分布式电源及储能（含在运与拟并网）、负荷、开关、测量与控制系统等。

8.1 电网模型

a） 传输线：对于 15km 以下的架空线或电缆，宜采用 π 形等效模型；对于 15km 以上的架空线或电缆，推荐采用贝瑞隆（Bergeron）模型；
b） 变压器：宜采用基本变压器模型，并通过跨接在一侧绕组的并联电流源和电阻来计及磁化非线程和铁芯损耗分量；
c） 负荷模型：推荐采用有功功率及无功功率随电压、频率变换的动态模型。

8.2 分布式电源模型

a） 风电场：风电场仿真模型应符合 GB/T 19963.1 的要求；
b） 光伏电站：光伏电站仿真模型应符合 GB/T 32826 的要求；

8.3 储能电站模型

储能电站仿真模型应符合 GB/T 42716-2023 的要求；

9 指标计算方法

9.1 通用要求

9.1.1 电磁暂态仿真评估的统计时间宜不小于 24h。可将 24 h 运行时间划分为若干连续时间段，每段长度 ΔT 应为 1 min 的整数倍，并根据负荷、分布式电源及储能出力随时间变化的特性合理选取，宜与负荷、分布式电源及储能出力数据的时间间隔一致或为其整数倍。

9.1.2 在每一时间段 ΔT 内，电磁暂态仿真时长 T_{seg} 不应小于相应电能质量指标规定的基本测量时间窗口。

注 1：对于部分时段无有效出力的分布式电源及储能，电能质量评估的统计时间可按其典型出力时段设置；无出力时段不作为分布式电源及储能接入影响的重点评价对象。

9.2 供电电压偏差

在并网点，基于电磁暂态仿真结果获取覆盖评估统计时间的电压有效值时间序列。每一时间段 ΔT 内，获得电压有效值的基本测量时间窗口宜为 10 周波，等间距选取测量时间窗口，连续测量并计算电压有效值，最终计算获得供电电压偏差值。1min 电压有效值应按式（1）进行计算。

$$U_{1\min}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}U_k^2} \quad \text{(1)}$$

式中：

N—测量间隔内U_k的个数；现场测量时，当测量时间为 1 min 且以 10 周波为基本测量时间窗口时，N通常取300；仿真评估时，当采用时长T_{seg}的仿真片段近似代表 1 min 时，N为该片段内 10 周波电压有效值的个数，应根据仿真片段时长合理选取，并保证统计结果具有足够的代表性。

U_k—第k个10周波电压有效值；

U_{1min}—1min电压有效值。

电压偏差超上限和超下限的时间累计之和为电压越限时间，按式（2）计算并网点电压合格率。

$$\gamma(\%)=(1-\frac{T_{ui}+T_{di}}{T_i})\times 100\% \quad \text{(2)}$$

式中：

γ—并网点电压合格率，%。

T_{ui}—电压超上限时间累计之和，min；

T_{di}—电压超下限时间累计之和，min；

T_i—电压统计总时间，min；

9.3 电压波动

在分布式电源和储能并网点，基于电磁暂态仿真结果获取覆盖评估统计时间的电压有效值时间序列。可将评估统计时间划分为若干连续时间段 ΔT，并在每一时间段 ΔT 内选取时长不小于T_{seg}的仿真片段，以10周波为基本测量窗等间距计算电压有效值序列。

按 DL/T 1724 的规定，在电压有效值序列中识别各次电压稳态及其开始与结束，提取稳态电压波动值 d_c，最大电压变动值 $d_{\max}$，电压波动越限时间 $T_{\max}$。

一系列稳态电压变动值中的第i个 d_c 按式（3）计算。

$$d_{ci}=(\frac{U_{end_i-1}-U_{start_i-1}}{U_N})\times 100\% \quad \text{.....(3)}$$

式中：

U_{end_i}—前一个稳态的最后一个电压半波有效值。

U_{start_i-1}—后一个稳态的第一个电压半波有效值。

U_N—并网点标称电压。

一系列最大电压变动值中的第i个 $d_{\max}$ 按式（4）计算。

$$d_{\max i}=\max(\frac{U_{end_i-1}-U_{hp}(t)}{U_N}\times 100\%) \quad \text{.....(4)}$$

式中：

$U_{hp}(t)$—电压处于非稳态期间的电压方均根值。

电压波动越限时间 $T_{\max}$ 为电压变动特征内的电压变动超过限制的累计时间。

注：电压波动主要出现在负荷或分布式电源出力变化显著的时段，仿真时可优先选取该时段进行分析

9.4 闪变

闪变指标应基于仿真输出的并网点电压数据，采用 IEC 61000-4-15 所定义的数字闪变算法进行计算。仿真应覆盖评估统计时间的运行工况，可采用连续仿真或分段仿真方式。

当采用分段仿真方式时，可在评估统计时间内选取若干分布式电源及储能出力波动最显著的代表性时间段，每段连续电磁暂态仿真时间宜不小于 10 min。对第 j 个时间段的仿真电压波形计算短时间闪变值 $P_{st,j}$，各时间段的 $P_{st,j}$ 构成代表评估统计时间的运行状态的闪变评估结果，其最大值 $P_{st,max}$ 作为并网点闪变评估值，并与相应限值进行比较

9.5 谐波

a) 谐波电流

在分布式电源和储能并网点，提取仿真得到的覆盖评估统计时间的瞬时电流波形。每一时间段 ΔT 内，以 10 个工频周期为谐波计算采样窗口，采用傅里叶级数分解得到基波与各次谐波分量，取 3s 内谐波数值的方均根值作为第 H 次谐波的计算结果。

根据 GB/T 14549—1993 定义计算电流总谐波畸变率 R_5：

$$R_5=\frac{I_H}{I_i}\times 100\% \quad \text{.....(5)}$$

其中，I_H 为谐波电流含量，I_i 为基波电流（方均根值）。

b) 谐波电压

在分布式电源和储能并网点，提取仿真得到的覆盖评估统计时间的运行状态的瞬时电压波形。在每一时间段 ΔT 内，以 10 个工频周期为谐波计算采样窗口，采用傅里叶级数分解得到基波与各次谐波分量，取 3s 内谐波数值的方均根值作为第 H 次谐波的计算结果。

根据 GB/T 14549—1993 定义计算电压总谐波畸变率 R_6：

$$R_6=\frac{U_H}{U_i}\times 100\% \quad \text{.....(6)}$$

式中：

U_H—谐波电压含量，

U_i—基波电压方均根值。

谐波的计算要在 3s 计算取值的基础上，综合计算出 3min 的统计值，计算方法为统计时间间隔内所

包含各 3s 计算结果的最大值。并取统计时段各相计算值的 95%概率值作为越限判据。

9.6 电压不平衡度

在分布式电源和储能并网点，提取仿真得到覆盖评估统计时间的运行状态的三相电压波形。在每一时间段 ΔT 内，采用对称分量法分解为正序、负序和零序分量，根据 GB/T 15543—2008 的定义计算三相电压不平衡度 R_7。

$$R_7 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

R_7 —负序电压不平衡度，

U_2 —三相电压的负序基波分量方均根值，

U_1 —三相电压的正序基波分量方均根值。

三相不平衡度的计算间隔为 1min，提取电压负序不平衡度计算值的 10min 方均根值的 95%概率大值及所有测量值中的最大值。

9.7 频率偏差

在分布式电源和储能并网点提取仿真得到的覆盖评估统计时间的运行状态的三相电压波形。在每一时间段 ΔT 内，以 10s 为统计间隔，采用同步坐标系锁相环计算并网点基波频率及频率合格率。根据 GB/T 15945—2008 的定义，并网点频率偏差 R_8：

$$R_8 = f - f_N \quad (8)$$

式中：

f —并网点统计间隔内的频率均值；

f_N —系统额定频率。

频率合格率通过统计频率超限时间来表征电网频率合格率，按式（10）进行计算。

$$\beta = (1 - \frac{t_B}{t_N}) \times 100\% \quad (9)$$

式中：

t_B —频率超越时间；

t_N —频率统计时间。

10 评估结果

分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估结果宜包含下述内容：

a） 待评估电网拓扑及参数；

b） 待并网分布式电源和储能详细电磁暂态模型及控制参数。

c） 评估标准及限值指标；

d） 供电电压偏差评估结论。

e） 电压波动评估结论；

f） 闪变评估结论；

g） 谐波电压、电流评估结论；

h） 电压不平衡度评估结论；

i） 频率偏差评估结论。

附 录 A
（资料性）
光伏发电系统电磁暂态仿真模型典型结构

光伏发电系统包括主电路拓扑、光伏发电系统最大功率点跟踪控制、光伏并网逆变器控制模型，故障条件下的光伏发电系统控制。

A.1 主电路拓扑

光伏发电系统两级式并网结构为双极功率变流电路，前级采用 Boost 变流器实现直流侧输出电压的升压功能，后级 DC/AC 变流器采用三相全桥逆变电路实现并网逆变功能，见图 A.1。

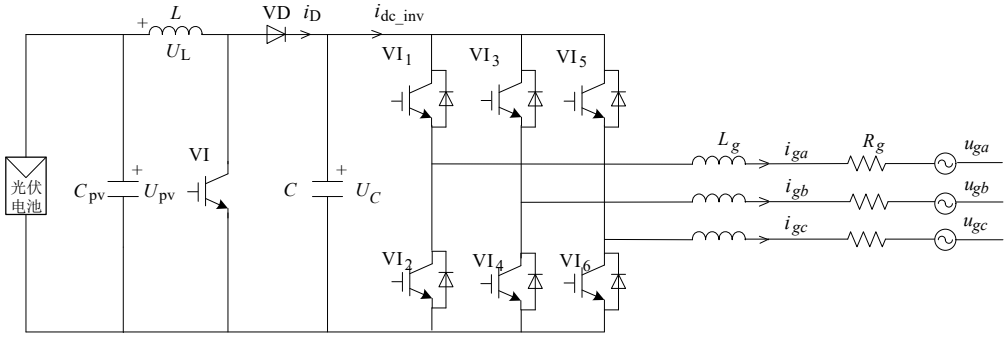


图 A.1 典型的两级式光伏并网逆变器的主电路拓扑

说明：
C_{pv}——电磁暂态仿真模型中，光伏侧直流支撑电容。
U_{pv}——电磁暂态仿真模型中，光伏方阵输出电压，即前级 Boost 电路的输入电压。。
L——电磁暂态仿真模型中，光伏侧 Boost 电路储能电感。
U_{L}——电磁暂态仿真模型中，光伏侧 Boost 电路储能电感电压。
VI——电磁暂态仿真模型中，Boost 升压电路中的主控开关器件。
VD——电磁暂态仿真模型中，Boost 升压电路中的续流二极管。
i_{D}——电磁暂态仿真模型中，Boost 升压电路中的续流二极管电流。
C——电磁暂态仿真模型中，直流母线电容。
U_c——电磁暂态仿真模型中，直流母线电压。
$i_{\mathrm{dc_inv}}$——电磁暂态仿真模型中，变流器逆变侧输入电流。
VI_{1-6}——电磁暂态仿真模型中，三相全桥逆变电路中的六个绝缘栅双极型晶体管（IGBT）开关管。
L_{g}——电磁暂态仿真模型中，变流器并网电感。
R_{g}——电磁暂态仿真模型中，变流器并网电阻。
u_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网三相电压。
i_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网三相电流。

A.2 光伏发电系统最大功率点跟踪控制

对于光伏发电系统，需要利用控制手段实现光伏电池输出最大功率。以电导增量法为例，

电导增量法通过实时计算和比较光伏电池的电导（I/U）与电导的变化量（$\Delta I/\Delta U$）来判断当前工作点与最大功率点（MPP）的相对位置。图 A.2 所示为光伏电池 P-U 特性曲线及$dP-dU_{\mathrm{pv}}$的变化特性。

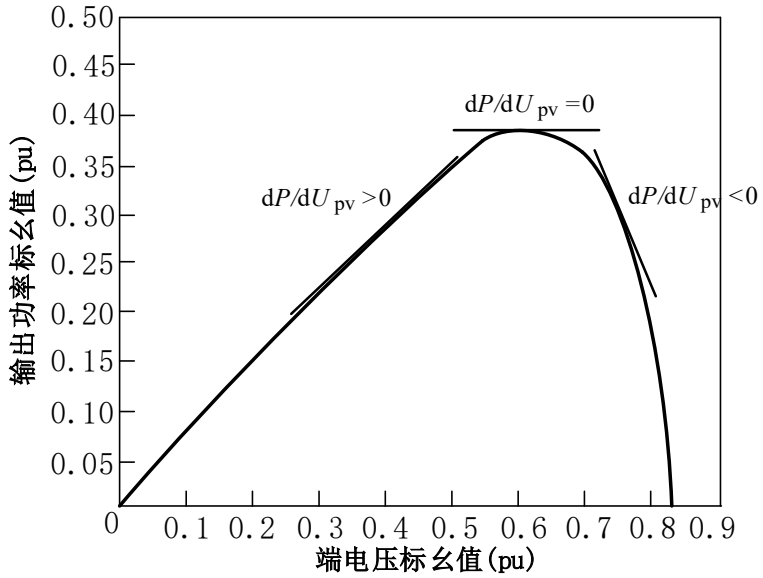


图 A.1　典型的两级式光伏并网逆变器的主电路拓扑

由光伏电池输出功率-电压关系，对光伏电池输出电压 U_{pv} 求导，可得：

$$\frac{dP}{dU_{pv}} = I + U_{pv}\frac{dI}{dU_{pv}} \tag{A.1}$$

由图 A.2 可知，当 $dP/dU_{pv} = 0$ 时，光伏电池的输出功率达到最大。由式(A.1)可推导出光伏电池工作于最大功率点时需满足以下关系：

$$\frac{dI}{dU_{pv}} = -\frac{1}{U_{pv}} \tag{A.2}$$

采用电导增量（INC）法进行最大功率点跟踪的判别如下：

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta J}{\Delta U} > -\dfrac{1}{U} & \text{最大功率点在当前工作点左边} \\ \dfrac{\Delta J}{\Delta U} = -\dfrac{1}{U} & \text{当前工作点即为最大功率点} \\ \dfrac{\Delta J}{\Delta U} < -\dfrac{1}{U} & \text{最大功率点在当前工作点右边} \end{cases} \tag{A.3}$$

电导增量法的主要优点是 MPPT 的控制稳定度高，当外部环境参数变化时，系统能平滑地追踪其变化，与光伏电池的特性及参数无关。然而，电导增量法对控制系统要求相对较高，其初始化参数对跟踪性能有较大影响，若设置不当，该方法容易产生振荡和误判的问题。

A.3　光伏并网逆变器控制模型

光伏发电系统并网逆变器控制系统典型模型框图如图 A.3 所示，包括两套独立的控制器，分别控制 Boost 变流器和网侧逆变器。

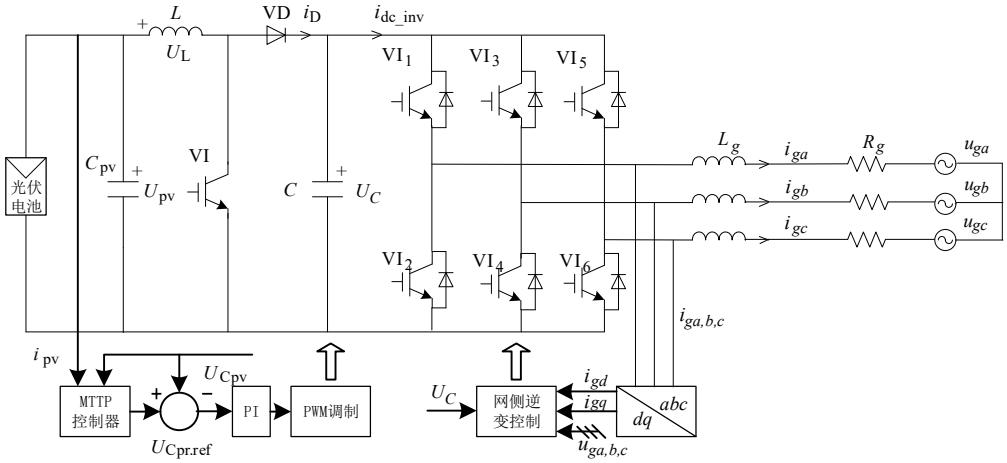


图 A.3　光伏发电系统并网逆变器控制系统典型模型框图

说明：

$U_{Cpr.ref}$——电磁暂态仿真模型中，MPPT 控制器计算出的光伏阵列最佳工作电压，即期望的电压参考值。

U_{Cpv}——电磁暂态仿真模型中，光伏电池输出端的直流电压。

i_{pv}——电磁暂态仿真模型中，光伏阵列的输出电流。

$i_{ga,b,c}$——电磁暂态仿真模型中，电网 abc 相电流。

i_{gd}, i_{gq}——电磁暂态仿真模型中，并网电流在 d 轴和 q 轴上的参考值。

$u_{ga,b,c}$——电磁暂态仿真模型中，电网 abc 相电压。

A.4　故障条件下的光伏发电系统控制

故障条件下，光伏发电系统的控制方法可在非耦合型风电机组网侧变流器控制方法的基础上，作如下改变：网侧变流器需根据并网导则的要求设置正序无功电流指令，限制正序有功电流输出，因无需抑制直流母线电压脉动，负序有功与无功电流分量指令可设置为零。

综上所述，故障持续阶段光伏发电系统并网逆变器的控制结构如图 A.4 所示。

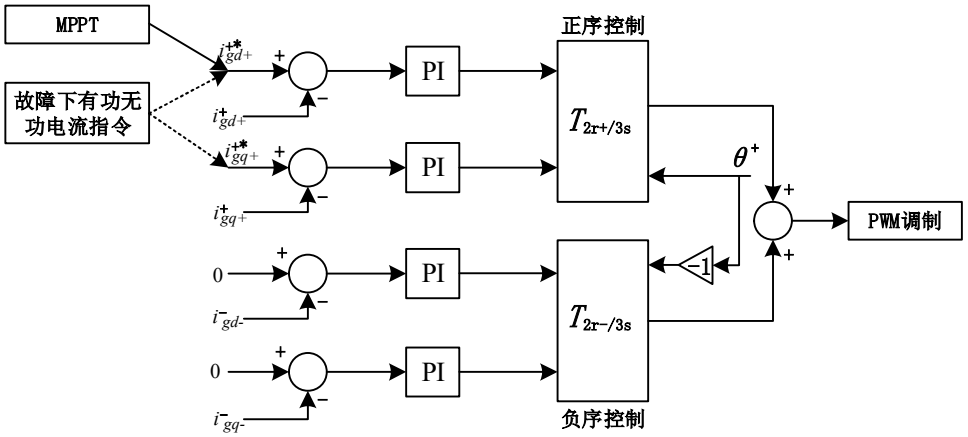


图 A.4　故障持续阶段光伏发电系统并网逆变器的控制结构

说明：

i^{+*}_{gq+}, i^{-*}_{gq-}——电磁暂态仿真模型中，正负序无功电流指令。

i^{+*}_{gd+}, i^{-*}_{gd-}——电磁暂态仿真模型中，正负序有功电流指令。

i^{+}_{gq+}, i^{-}_{gq-}——电磁暂态仿真模型中，正负序无功电流实际值。

i^{+}_{gd+}, i^{-}_{gd-}——电磁暂态仿真模型中，正负序有功电流实际值。

θ ——电磁暂态仿真模型中，锁相环输出的正序电压矢量的相位信号。

$T_{2r+/3s}$ ——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到三相旋转坐标系的正序变化。

$T_{2r-/3s}$ ——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到三相旋转坐标系的负序变化。

附 录 B
（资料性）
直驱风机电磁暂态仿真模型典型结构

直驱风机电磁暂态仿真模型典型结构包括电气主拓扑、最大风能捕获控制，桨距角控制、机侧变流器控制、网侧变流器控制等模块。

B.1 主电路拓扑

风电机组变流器多采用两电平电压源型结构，拓扑图如图 B.1 所示。变流器由背靠背连接的全控整流桥（也称机侧变流器）与全控逆变桥（也称网侧变流器）通过直流母线连接在一起，见图 B.1。

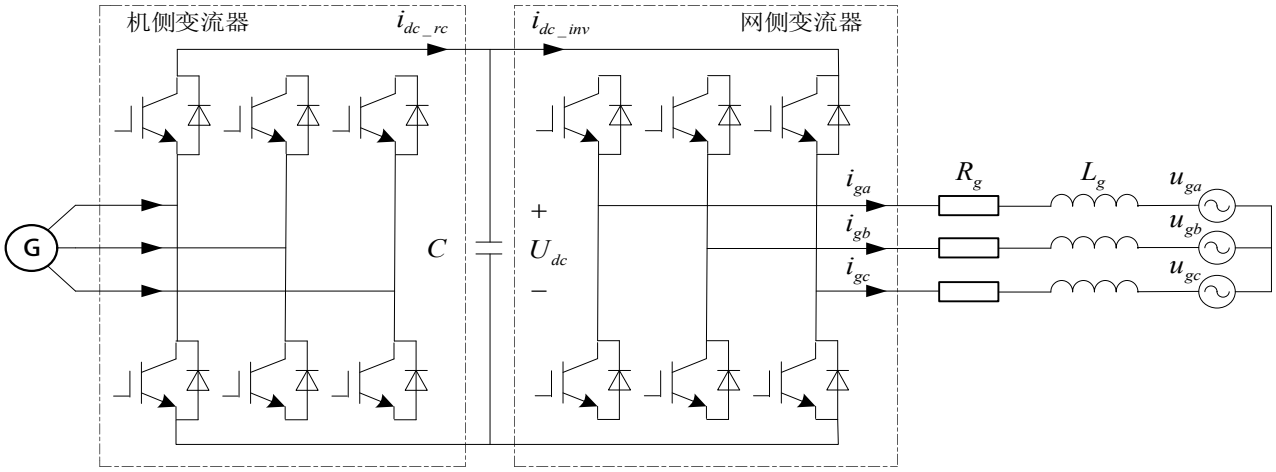


图 B.1 两电平电压源型功率变流器

说明：
$i_{\mathrm{dc_rc}}$——电磁暂态仿真模型中，变流器逆变侧输入电流。
$i_{\mathrm{dc_inv}}$——电磁暂态仿真模型中，变流器整流侧输出电流。
L_{g}——电磁暂态仿真模型中，变流器并网电感。
U_{dc}——电磁暂态仿真模型中，变流器直流母线电压。
R_{g} ——电磁暂态仿真模型中，变流器并网电阻。
u_{g} ——电磁暂态仿真模型中，电网三相电压。
u_{gabc} ——电磁暂态仿真模型中，电网三相电压。
i_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网三相电流。

B.2 最大风能捕获控制

根据发电机输出功率控制手段的不同，最大风能捕获控制包括若干典型方法。其中，功率信号反馈法由于无需测量风速且输出功率脉动较小，在实际中应用更广泛。功率信号反馈法的控制系统示意图如图 B.2 所示。

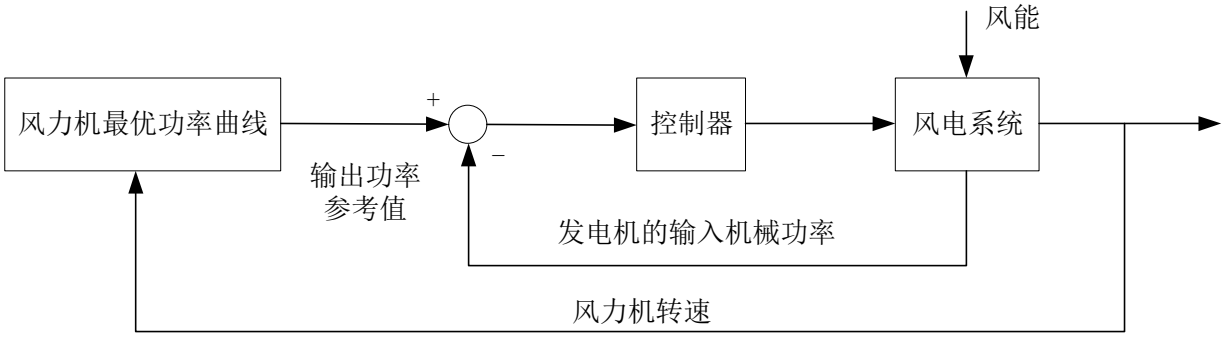


图 B.2　功率信号反馈控制系统示意图

B.3　桨距角控制

由于风力机模型的强非线性，为降低控制难度，大多数桨距角控制器都基于风力机的线性模型而设计。该线性模型通过在风力机转矩特性曲线上选取一稳定工作点，并对非线性的风力机模型做线性化处理而得到。典型控制框图如图 B.3。

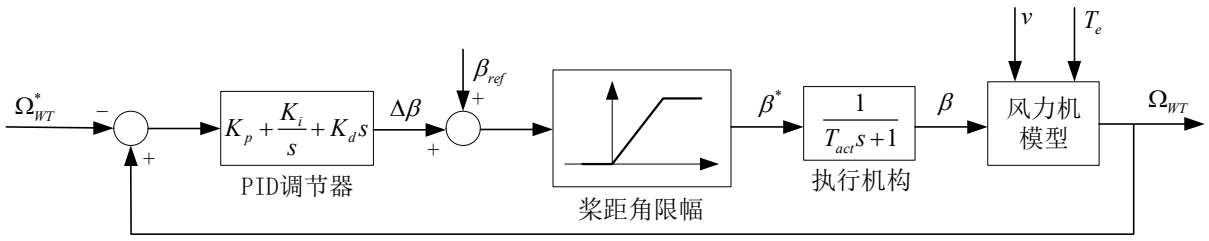


图 B.3　典型线性桨距角控制器控制框图

说明：

Ω^*_{WT}——电磁暂态仿真模型中，风力机角速度参考值。

Ω_{WT}——电磁暂态仿真模型中，风力机角速度实际值。

β_{ref}——电磁暂态仿真模型中，风力机桨距角给定值。

$\Delta\beta$——电磁暂态仿真模型中，风力机桨距角增量。

β^*——电磁暂态仿真模型中，风力机桨距角指令值。

β——电磁暂态仿真模型中，风力机桨距角。

T_{act} ——电磁暂态仿真模型中，执行机构时间常数。

T_{e} ——电磁暂态仿真模型中，风力机电磁转矩。

v——电磁暂态仿真模型中，风速。

B.4　机侧变流器控制

发电机由机侧变流器控制，通过控制发电机转矩，可实现其变速运行，以捕获最大风能。基于磁场或电压定向的 dq 旋转坐标系下的发电机模型，可方便地设计控制器，实现发电机输出有功功率和无功功率的解耦控制。

同步发电机的转子磁链由转子绕组的励磁电流（电励磁发电机）或永磁体（永磁发电机）提供，其幅值恒定，因而同步发电机通常采用转子磁链定向控制。因此，同步发电机机侧变流器的转子磁链定向矢量控制系统框图如图 B.4 所示。

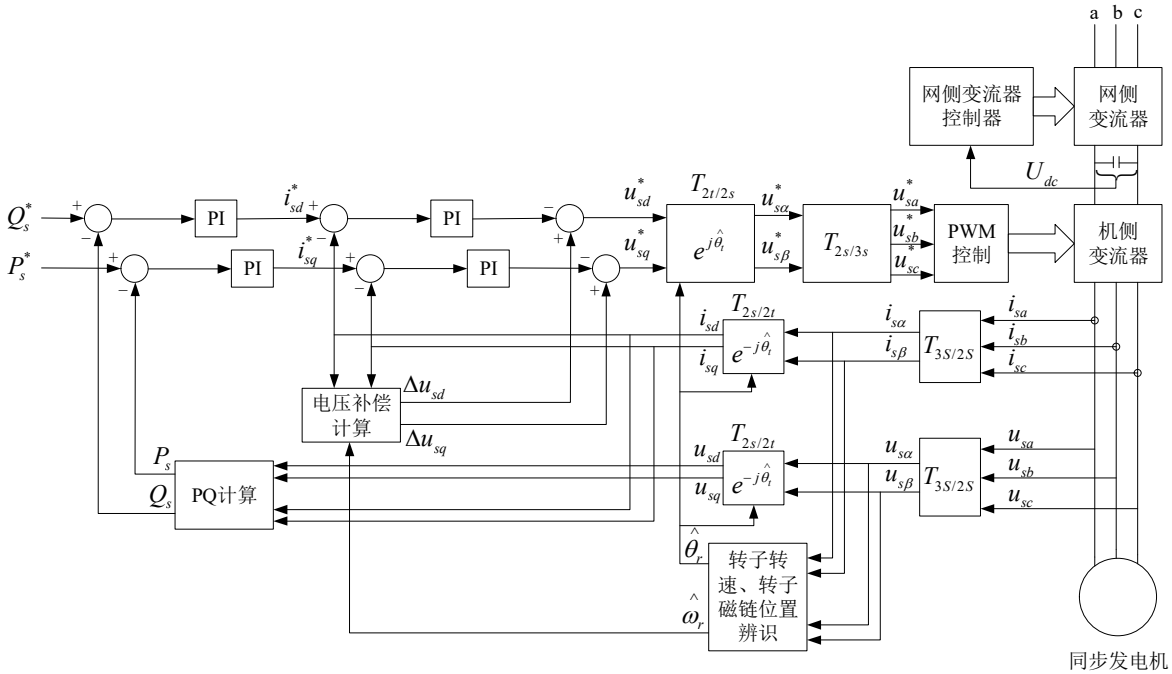


图 B.4　同步发电机机侧变流器控制框图

说明：

P_s^*，Q_s^*——电磁暂态仿真模型中，定子有功、无功功率给定值。

P_s，Q_s——电磁暂态仿真模型中，定子输出有功、无功功率。

i_{sd}^*，i_{sq}^*——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电流参考值。

i_{sd}，i_{sq}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电流。

$i_{s\alpha}$，$i_{s\beta}$——电磁暂态仿真模型中，定子侧两相静止坐标系下的电流变量。

i_{sabc}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 abc 相电流实际值。

Δu_{sd}，Δu_{sq}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电压补偿。

u_{sd}^*，u_{sq}^*——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电压指令值。

u_{sd}，u_{sq}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电压。

$u_{s\alpha}$，$u_{s\beta}$——电磁暂态仿真模型中，定子侧两相静止坐标系下的电压变量。

u_{sabc}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 abc 相电压实际值。

u_{sabc}^*——电磁暂态仿真模型中，定子侧 abc 相电压指令值。

U_{dc}——电磁暂态仿真模型中，变流器直流母线电压。

$T_{2r/2s}$——电磁暂态仿真模型中，两相旋转坐标系到两相静止坐标系的变化。

$T_{2s/2r}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变化。

$T_{2s/3s}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到三相静止坐标系的变化。

$T_{3s/2s}$——电磁暂态仿真模型中，三相静止坐标系到两相静止坐标系的变化。

θ_r——电磁暂态仿真模型中，转子磁链定向的转子位置角。

ω_r——电磁暂态仿真模型中，解耦控制用的角速度。

B.5　网侧变流器控制

网侧变流器将发电机机侧输出的有功功率注入电网，实现发电机和电网的功率平衡，同时控制网侧输出电能的功率因数。通过控制网侧变流器输出电压 dq 轴分量可独立调节其 dq 轴输出电流，从而间接实现网侧变流器输出有功和无功功率的解耦控制。系统的控制框图如图 B.5 所示。

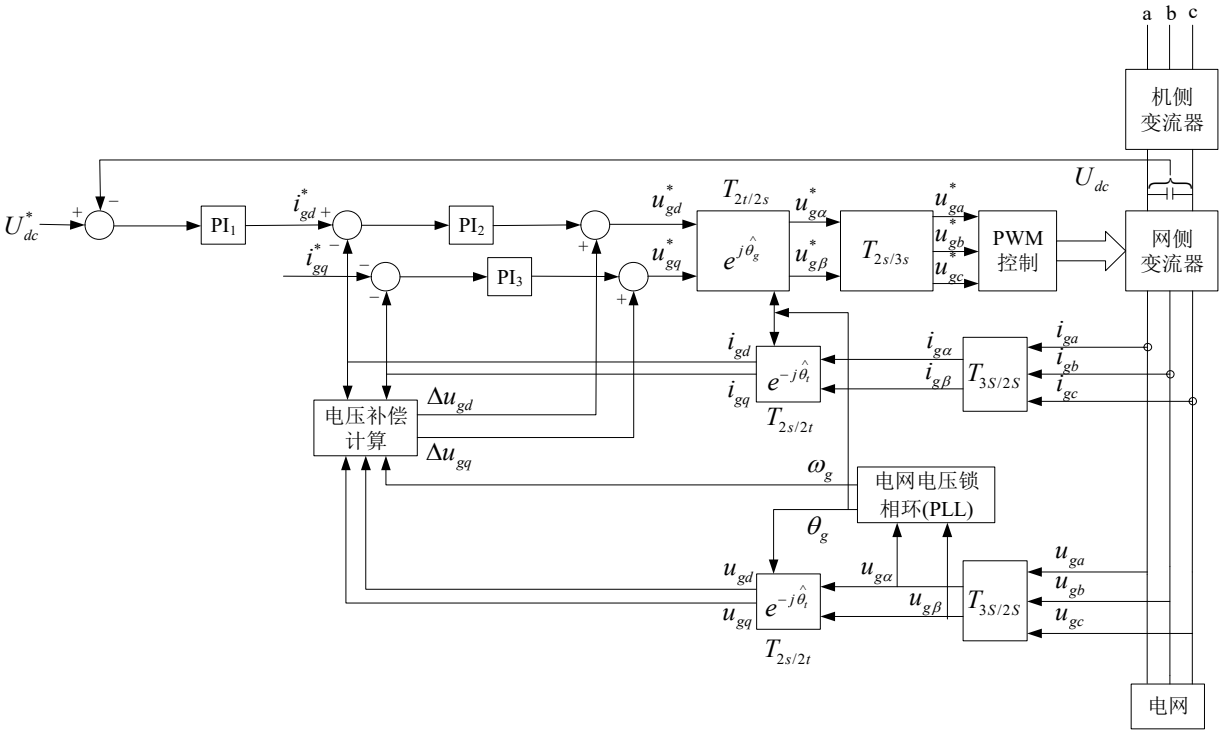


图 B.5　网侧变流器电网电压定向控制系统框图

说明：

U^*_{dc}——电磁暂态仿真模型中，变流器直流母线电压参考值。

U_{dc}——电磁暂态仿真模型中，变流器直流母线电压。

i^*_{gd}，i^*_{gq}——电磁暂态仿真模型中，电网 d 轴、q 轴电流参考值。

i_{gd}，i_{gq}——电磁暂态仿真模型中，电网 d 轴、q 轴电流。

$i_{\mathrm{s\alpha}}$，$i_{\mathrm{s\beta}}$——电磁暂态仿真模型中，电网两相静止坐标系下的电流变量。

i_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网 abc 相电流实际值。

Δu_{gd}，Δu_{gq}——电磁暂态仿真模型中，电网 d 轴、q 轴电压补偿。

u^*_{gd}，u^*_{gq}——电磁暂态仿真模型中，电网 d 轴、q 轴电压指令值。

$u^*_{\mathrm{g\alpha}}$，$u^*_{\mathrm{g\beta}}$——电磁暂态仿真模型中，电网两相静止坐标系下的电压变量指令值。

u_{gd}，u_{gq}——电磁暂态仿真模型中，电网 d 轴、q 轴电压。

$u_{\mathrm{g\alpha}}$，$u_{\mathrm{g\beta}}$——电磁暂态仿真模型中，电网两相静止坐标系下的电压变量。

u_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网 abc 相电压实际值。

u^*_{gabc}——电磁暂态仿真模型中，电网 abc 相电压指令值。

$T_{2r/2s}$——电磁暂态仿真模型中，两相旋转坐标系到两相静止坐标系的变化。

$T_{2s/2r}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变化。

$T_{2s/3s}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到三相静止坐标系的变化。

$T_{3s/2s}$——电磁暂态仿真模型中，三相静止坐标系到两相静止坐标系的变化。

θ_{g}——电磁暂态仿真模型中，电网电压矢量的空间相位角。

ω_{g}——电磁暂态仿真模型中，　电网电压的角频率。

附 录 C
（资料性）
双馈风机电磁暂态模型

双馈风机只有机侧变流器模型与直驱不同，在双馈异步发电机中，其定子直接与电网相连，电网电压的幅值和频率在额定运行工况下是恒定的，因而常采用定子电压或定子磁链定向的控制方法。

双馈风机机侧变流器控制模型典型结构如图 C.1。

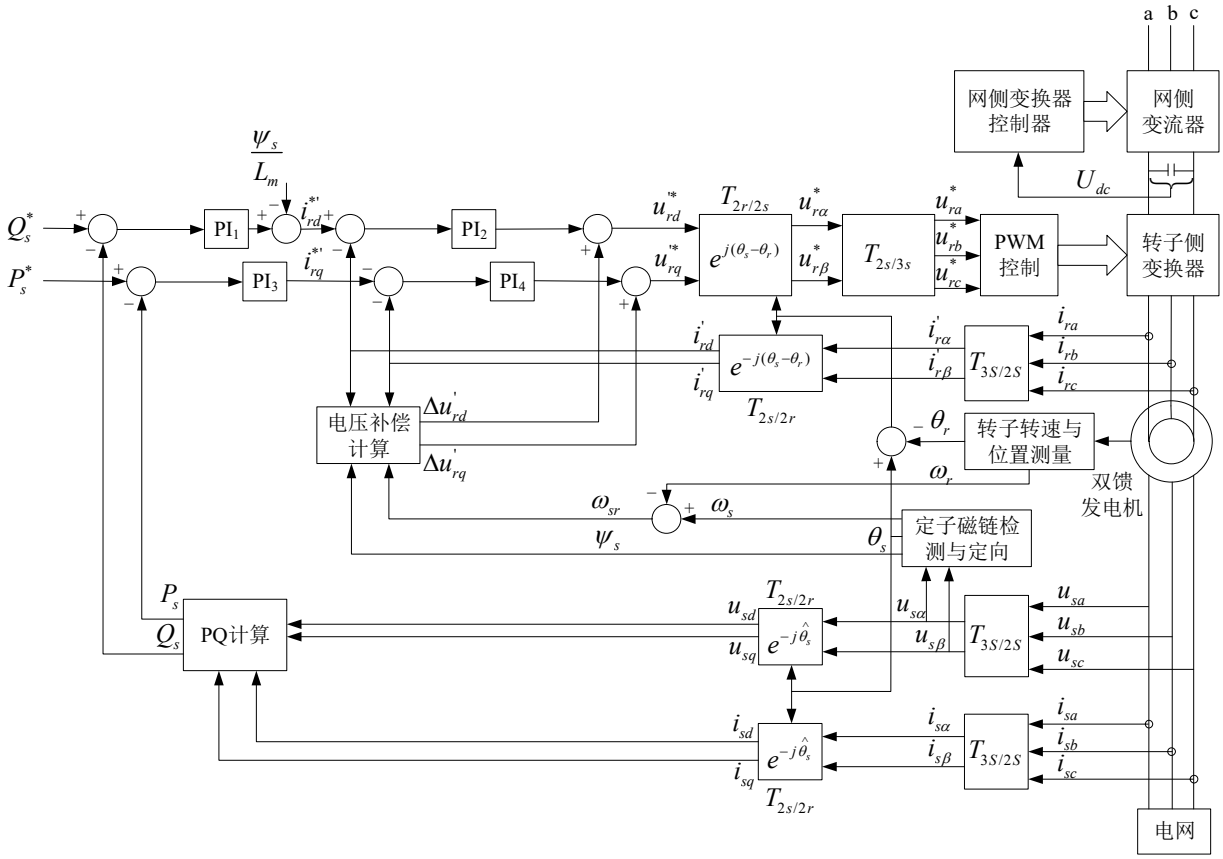


图 C.1 双馈风机机侧变流器控制框图

说明：

P_s^*，Q_s^*——电磁暂态仿真模型中，定子有功、无功功率给定值。

P_s，Q_s——电磁暂态仿真模型中，定子输出有功、无功功率。

i_{sd}，i_{sq}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电流。

$i_{rd}^{*'}$，$i_{rq}^{*'}$——电磁暂态仿真模型中，转子侧 d 轴、q 轴电流矢量给定。

$i_{rd}^{'}$，$i_{rq}^{'}$——电磁暂态仿真模型中，转子侧 d 轴、q 轴电流。

$i_{r\alpha}^{'}$，$i_{r\beta}^{'}$——电磁暂态仿真模型中，转子侧两相静止坐标系下的电流。

$i_{s\alpha}$，$i_{s\beta}$——电磁暂态仿真模型中，定子两相静止坐标系下的电流变量。

i_{rabc}——电磁暂态仿真模型中，转子侧 abc 相电流实际值。

i_{sabc}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 abc 相电流实际值。

$\Delta u_{rd}^{'}$，$\Delta u_{rq}^{'}$——电磁暂态仿真模型中，绕组折算到定子侧的 d 轴、q 轴电压补偿。

u_{sd}，u_{sq}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 d 轴、q 轴电压。

$u_{rd}^{'*}$，$u_{rq}^{'*}$——电磁暂态仿真模型中，绕组折算到定子侧 d 轴、q 轴电压矢量指令。

$u_{r\alpha}^*$，$u_{r\beta}^*$——电磁暂态仿真模型中，转子侧两相静止坐标系下的电压变量指令。

$u_{s\alpha}$，$u_{s\beta}$——电磁暂态仿真模型中，定子侧两相静止坐标系下的电压变量。

u_{rabc}^*——电磁暂态仿真模型中，转子侧 abc 相电压指令值。

u_{sabc}——电磁暂态仿真模型中，定子侧 abc 相电压实际值。
U_{dc}——电磁暂态仿真模型中，变流器直流母线电压。
$T_{2r/2s}$——电磁暂态仿真模型中，两相旋转坐标系到两相静止坐标系的变化。
$T_{2s/2r}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变化。
$T_{2s/3s}$——电磁暂态仿真模型中，两相静止坐标系到三相静止坐标系的变化。
$T_{3s/2s}$——电磁暂态仿真模型中，三相静止坐标系到两相静止坐标系的变化。
θ_{r}——电磁暂态仿真模型中，转子磁链定向的转子位置角。
ω_{r}——电磁暂态仿真模型中，解耦控制用的角速度。
θ_{s}——电磁暂态仿真模型中，风力机器轴与发电机轴的扭角。
ω_{s}——电磁暂态仿真模型中，同步旋转电角速度。
Ψ_{s}——电磁暂态仿真模型中，定子磁链矢量。
L_{m}——电磁暂态仿真模型中，旋转坐标系下的定转子之间的互感。
ω_{sr}——电磁暂态仿真模型中，转差电角速度。

附 录 D
（资料性）
电化学储能电站电磁暂态仿真模型典型结构

电化学储能电站电磁暂态仿真模型典型结构见图 D.1。

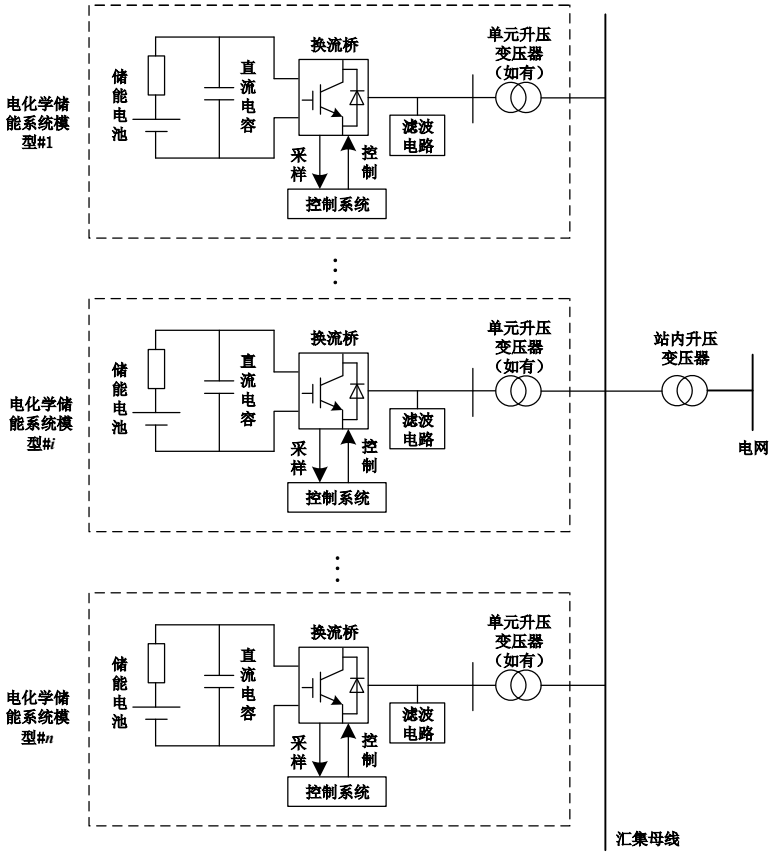


图 **D**.1 电化学储能电站电磁暂态仿真模型典型结构图

附 录 E
（资料性）
基于电磁暂态仿真的分布式光伏接入配电网电能质量预测评估案例

E.1 数据收集

E.1.1 系统概况

某城市配电网中一条 10 kV 馈线拟在公共连接点（PCC）接入屋顶光伏电站，需对接入后 PCC 点的电能质量进行预测评估。系统主要构成包括：

a） 上级电网；
b） 10kV 架空/电缆线路及多台 10kV/0.4kV 配电变压器；
c） 低压侧居民及工商业负荷；
d） 拟建屋顶光伏阵列及其并网逆变器；

配电网拓扑结构及光伏接入位置如图E.1所示：

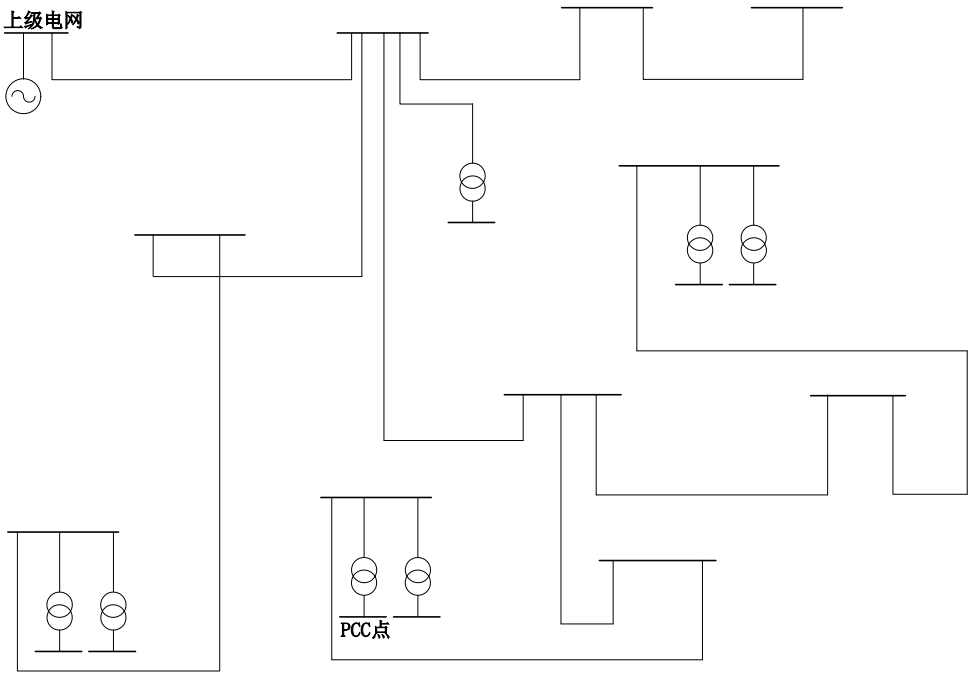


图 E.1 配电网拓扑结构及 PCC 点位置

E.1.2 运行数据

评估对象选择系统最大负荷方式，相关运行数据包括：

a） 目标电网配变负载侧 24 小时有功功率、无功功率、电压、频率等数据，采样间隔为 15 分钟；
b） PCC 点 24 小时运行电压、频率、有功功率、无功功率；
c） 屋顶光伏站址 24 小时环境温度及太阳辐射强度；

其中某配变侧负荷在光伏有效出力时段的有功、无功功率曲线如图E.2所示。

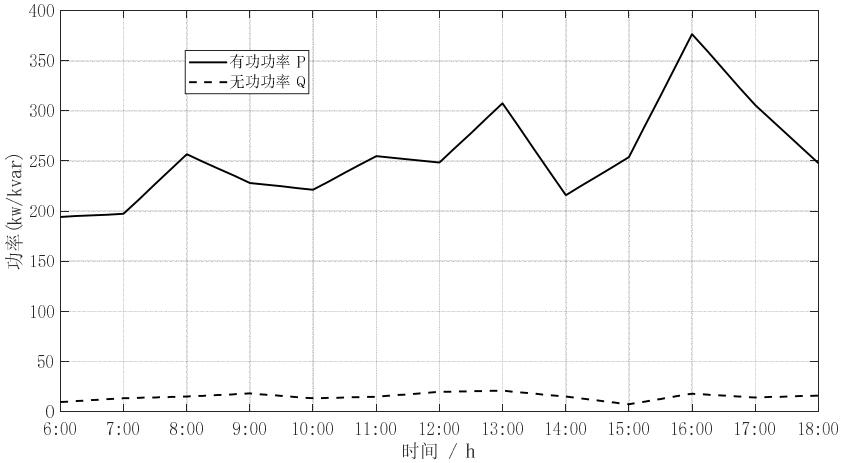


图 E.2　某配变侧负荷有功、无功功率曲线

E.2　电磁暂态仿真模型

E.2.1 模型及参数

依据本导则第8章，在电磁暂态仿真软件中构建了包含上级等值电网，传输线/电缆、变压器、母线及接地、无功补偿装置、负荷、开关、量测与控制系统等的全电磁暂态仿真模型，各设备主要参数如下：

a） 上级电网采用戴维南等值，系统侧等值阻抗值为 0.02+j0.095 Ω；
b） 10kV 馈线总长度为 6.65km,线路正序及零序阻抗参数根据导线类型取值；
c） 配电变压器容量主要为 1.6~2MVA，负荷功率因素主要在 0.97~0.99 之间；
d） 屋顶光伏装机容量为 0.5MW；
e） 光伏并网逆变器模型参考本导则附录 A，包含主电路拓扑、光伏发电系统最大功率点跟踪控制、光伏并网逆变器控制模型等；
f） 电磁暂态仿真步长为 1e-6s；

E.2.2 运行时间划分

本案例根据负荷，环境温度及太阳辐射强度采集数据（15min），将光伏日照时段划分为若干连续时间段，各时间段电磁暂态仿真时间及配置如下：

a） 根据太阳辐射强度曲线，选取当天 06:00～18:00 为光伏有效出力时段，将该时段划分为 48 个连续的 15 min 时间段；
b） 第 k 个时间段对应区间为$[t_k,t_k+15min]$,k=1,2...48；
c） 第 k 个时间段,取采集到的负荷，环境温度及太阳辐射强度等数据，构建该时间段的代表性工况；
d） 对每个时间段，电磁暂态仿真时长 T_{seg} 取 15~20s；
e） 在各时间段，记录 PCC 点三相电压、电流瞬时值，并按本导则第 9 章的计算方法，求取该时间段的电压偏差、电压波动、谐波、电压不平衡度及频率偏差等指标，电压波动仿真优先针对光伏出力和负荷变化显著的代表性时间段进行；
f） 由各日照时间段的指标计算值按时间顺序构成覆盖光伏有效出力时段的指标序列，用于计算最大值、合格率、95 % 概率大值等统计量。

注 1：本案例闪变评估在光伏有效出力时段内选取负荷及光伏出力波动最显著的若干个代表性时段，分别开展了 10 min 的电磁暂态仿真，计算各时段的短时间闪变值，并取其中最不利结果作为并网点闪变评估值，与相应限值进行对比。

E.3　电能质量预测评估结果

E.3.1 评估结果汇总

本案例PCC点电能质量评估结果与相关标准限值对比结果如表E.1所示:

表E.1 PCC点电能质量评估结果与限值对比结果

电能质量类别	指标值	仿真结果	相关标准限值	结论
供电电压偏差	最大电压偏差（%）	-1.4163	±7%	合格
电压波动	稳态电压变动值（%）	0.25	≤3.3	合格
	最大电压变动值（%）	0.48	≤4	合格
电压闪变	闪变值	0.1939	＜1	合格
谐波	电压总谐波畸变率（%）	1.7433	＜4	合格
三相不平衡	三相电压不平衡度（%）	1.7033	≤2	合格
频率	最大频率偏差（Hz）	-0.0104	±0.2	合格

E.3.2 电能质量指标时序分布示例

为直观反映典型运行日内 PCC 点电能质量的变化情况，本案例给出部分指标随时间的分布曲线。对光伏有效出力时段，基于电磁暂态仿真结果形成指标序列。

a) 电压偏差时序分布曲线见图 E.3，横轴为时间，纵轴为对应时间段电压偏差代表值；
b) 电压总谐波畸变率时序分布曲线见图 E.4，图中给出指标随时间变化。

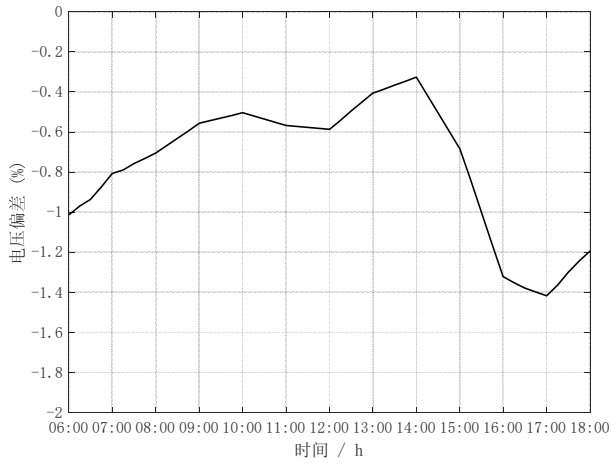


图 E.3 PCC 点电压偏差时序分布示意图

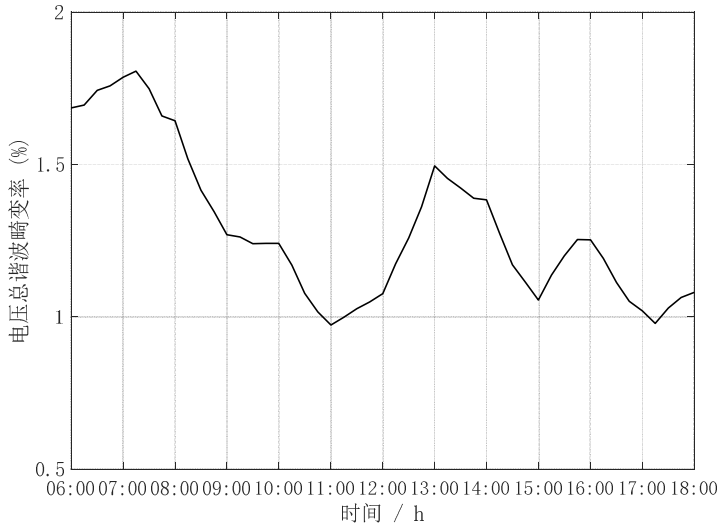


图 E.4　PCC 点电压总谐波畸变率时序分布示意图

从图 E.3 和图 E.4 可以看出，在本案例中：

a）　光伏有效出力时段内，PCC 点电压偏差随负荷和光伏出力略有变化，但各时段均满足电压偏差限值要求；

b）　同一时段内电压总谐波畸变率变化幅度较小，其统计结果明显低于相应限值。

E.3.3 综合评价

在本案例中，基于电磁暂态仿真得到的 PCC 点电压偏差、电压波动、闪变、谐波、电压不平衡度及频率偏差等各项电能质量指标，经统计并与限值对比表明：

a）　各指标均满足现行标准的限值要求；

b）　光伏接入未引起 PCC 点电能质量指标越限。

附 录 F
（资料性）
分布式电源和储能接入配电网电能质量仿真评估报告

F.1 概述

电能质量仿真评估的任务来源、必要性、主要工作内容、目的和意义等。

F.2 评估对象

a） 网侧模型：描述待评估电网的基本结构、设备模型和相关参数；
b） 分布式电源和储能模型：列出待评估分布式电源和储能系统的类型、规模及相关模型；
c） 运行数据及工况：说明所采用的负荷数据、气象数据以及数据采集的时间范围和运行方式。

F.3 评估过程

a） 建模仿真方法：详细叙述电磁暂态建模采用的办法、仿真分析过程；
b） 指标提取：描述电能质量指标的提取过程，并与相关标准进行比较。

F.4 评估结果

a） 并网点各项电能质量指标预测评估值是否越限；
b） 预测评估结果越限时，应提出相应的电能质量控制措施或建议。