



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

电力系统长期动态电压故障筛选和控制 决策技术规范

Technical specification for long-term voltage contingency screening and control
strategy of power systems

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次.....	I
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 预想故障集.....	2
6 静态电压稳定故障筛选.....	2
6.1 筛选指标.....	2
6.2 筛选方法.....	3
7 暂态电压稳定故障筛选.....	4
7.1 筛选指标.....	4
7.2 筛选方法.....	5
8 长期电压稳定故障筛选.....	6
8.1 筛选指标.....	6
8.2 筛选方法.....	6
9 控制决策.....	6
9.1 控制目标.....	6
9.2 控制措施.....	6
9.3 计算方法.....	6
10 故障筛选和控制决策系统.....	7

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。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会能源智慧化标工组归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司，内蒙古电力（集团）有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司，广东电网有限责任公司电网规划研究中心，许继电气股份有限公司。

本文件主要起草人：许鹏飞；宋墩文；张爱军；慕腾；樊占峰；余浩；杨学涛；樊海龙；刘会强；余高旺；陈勇；金楚；刘开欣；刘道伟；李坤译；杜三恩；冯静；杨红英；谢家正；赵高尚；肖项涛。

本文件为首次发布。

电力系统长期动态电压故障筛选和控制决策技术规范

1 范围

本文件规定了电力系统长期动态电压故障筛选和控制技术的要求、基础条件、方法和判据、提高稳定性的控制措施以及系统设计。

本文件适用于110kV 及以上电力系统的长期动态电压故障筛选和控制决策工作。其他电压等级可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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/T26399 电力系统安全稳定控制技术导则

GB/T40581—2021 电力系统安全稳定计算规范

GB 38755-2019 电力系统安全稳定导则

GB/T40615—2021 电压稳定评价导则

GB/T19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电

GB/T19964—2012 光伏发电站接入电力系统技术规定

GB/T36995—2018 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电压稳定 voltage stability

电力系统受到小扰动或大扰动后，系统电压能够保持或恢复到允许的范围，不发生电压崩溃的能力。

[来源：GB38755—2019，2.2.2]

3.2

静态电压稳定 steady-state voltage stability

电力系统受到小扰动后，系统所有母线保持稳定电压的能力。

[来源：GB38755—2019，2.2.2.1]

3.3

暂态电压稳定 transient voltage stability

电力系统受到大扰动后，系统所有母线保持稳定电压的能力。

[来源：GB38755—2019，2.2.2.2]

3.4

长期电压稳定 long-term voltage stability

电力系统受到大扰动后，长期过程中系统所有母线保持稳定电压的能力。

[来源：GB/T40615—2021，3.5]

3.5

机电暂态过程 electromechanical transient

由于发电机和电动机电磁转矩的变化所引起电机转子机械运动的变化过程，主要考虑几个周波到数十秒的过程。

注：电力系统机电暂态过程主要关注电力系统受到大扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的小扰动稳定性能，包括功角稳定、电压稳定和频率稳定。

3.6

长期动态过程 long-term dynamic

大规模系统扰动以及由此引发的有功和无功功率、发电量和用电量之间不平衡等持续时间较长、动作较缓慢的变化过程，主要考虑数十秒至数十分钟的动态过程。

注：电力系统长期动态过程主要关注电力系统遭受到扰动后，系统在长时间过程内维持正常运行的能力。慢速控制元件如励磁过励限制、自动发电控制、负荷频率控制等都会对其产生影响。

3.7

电压崩溃 voltage collapse

当系统处于电压不稳定状态，负荷仍持续地试图通过增加电流以获得更大的功率（有功或无功），导致系统大范围电压持续下降的过程。

3.8

新能源场站 new energy station

集中接入电力系统的风电场或光伏电站并网点以下所有设备。

注：包括变压器、母线、线路、变流器、储能、风电机组、光伏发电系统、无功调节设备及辅助设备。

[来源：GB38755—2019，2.11，有修改]

3.9

多馈入直流短路比 multi-infeed DC short-circuit ratio

直流馈入换流母线的短路容量与考虑其他直流回路影响后的等值直流功率的比值。

[来源：GB38755—2019，2.6]

3.10

新能源多场站短路比 multiple new energy station short-circuit ratio

新能源场站并网点的短路容量与考虑其他新能源场站影响后的新能源等值功率的比值。

4 总体要求

电力系统电压稳定故障的筛选包括静态电压稳定故障筛选、暂态电压稳定故障筛选、长期电压稳定故障筛选，在故障后运行方式下静态电压稳定裕度较低或需要考虑机组过励等长时间元件动态特性时，应采用长期电压稳定故障筛选。应针对电压越限故障应采取控制措施。

应首先建立预想故障集，应用静态、暂态和长期电压稳定分析手段进行电压稳定严重故障的筛选；再利用静态和暂态分析手段从预想故障集中筛选出可能导致长期电压失稳的故障，形成长期电压稳定待筛选故障集；然后利用长期分析手段针对长期电压稳定待筛选故障集进行校核。应一方面使中长期分析避免扫描大量故障集，保证计算效率，另一方面有效筛选出导致长期电压失稳的故障。

针对长期电压失稳故障，应制定控制决策，使系统保持电压稳定。

5 预想故障集

应首先建立预想故障集，包括：

- a) 静态电压稳定故障筛选的预想故障集，指无故障断开线路、变压器等元件后的电力系统方式；
- b) 暂态电压稳定故障筛选和长期电压稳定故障筛选，应遵循 GB38755—2019，选定需要研究的故障集；
- c) 对于直流输电系统，应包括单换流器闭锁、单极闭锁、双极闭锁、功率突降、再启动、换相失败等故障或扰动类型；
- d) 对于新能源场站，应包括任一新能源场站脱网、新能源大规模脱网等故障或扰动类型。

6 静态电压稳定故障筛选

6.1 筛选指标

6.1.1 区域负荷有功功率裕度

区域负荷有功功率裕度 K_{vp} 的计算按公式（1）。

$$K_{vp} = \frac{P_{\max} - P}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

P_{\max} ——临界运行点的有功功率值，单位为兆瓦（MW）；

P ——初始有功功率值，单位为兆瓦（MW）。

在区域最大负荷或最大断面潮流下，正常运行或检修方式下的区域负荷有功功率裕度应大于 8%；N-1 故障后运行方式的区域负荷有功功率裕度应大于 5%。受电比例较高的地区应适当调高负荷有功功率裕度。

区域负荷有功功率裕度的计算宜参考 GB/T40615—2021。

6.1.2 区域负荷无功功率裕度

区域负荷无功功率裕度 K_{vq} 的计算按公式（2）。

$$K_{vq} = \frac{Q_{\max} - Q}{Q} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

Q_{\max} ——临界运行点的无功功率值，单位为兆乏（Mvar）；

Q ——初始无功功率值，单位为兆乏（Mvar）。

在区域最大负荷或最大断面潮流下，正常运行或检修方式下的母线负荷无功功率裕度应大于 8%；N-1 故障后运行方式的母线负荷无功功率裕度应大于 5%。受电比例较高的地区应适当调高负荷无功功率裕度。

区域负荷无功功率裕度的计算宜参考 GB/T40615—2021。

6.1.3 多馈入直流短路比

送、受端系统的多馈入直流短路比应达到合理的水平。对于多回直流馈入情况，评价交直流系统相对强弱的多馈入短路比指标为：

- a) 强——MSCR 大于 3；
- b) 中——MSCR 在 2~3 之间；
- c) 弱——MSCR 小于 2。

多馈入直流短路比（MSCR）的计算宜参考 GB/T40581—2021。

6.1.4 新能源多场站短路比

送、受端系统的新能源多场站短路比应达到合理的水平。按照新能源场站并网点的新能源接入交流系统强度水平进行划分：

- a) 强系统——MRSCR 大于 3；
- b) 弱系统——MRSCR 在 2~3 之间；
- c) 极弱系统——MRSCR 小于 2。

新能源多场站短路比（MRSCR）的计算宜参考 GB/T40581—2021。

6.2 筛选方法

6.2.1 静态电压稳定故障筛选前应明确仿真模型和计算条件，包括分区划分、发电机及新能源模型、发电机可发的最大无功功率、发电机出力分配方式、机端电压、母线电压、直流模型、直流功率调整方式、无功补偿模型、变压器模型、负荷模型、负荷增长方式等。

6.2.2 仿真计算应采用静态模型，其中发电机一般采用含无功上下限的 PV 节点模型；负荷应采用恒功率模型，也可基于实际情况，采用 ZIP 模型，并进行比例配置，其中 Z、I、P 分别表示恒阻抗、恒电流、恒功率。

6.2.3 负荷增长方式对功率裕度影响较大，应根据实际情况确定，或采取典型增长方式，如计算区域负荷有功功率裕度，负荷增长方式为恒定功率因数增长；计算区域负荷无功功率裕度，负荷增长方式为有功功率不变、无功功率增长。电源出力应根据负荷增长量，按照电网实际出力分配情况确定。

6.2.4 对预想故障集分别进行区域负荷有功功率裕度、区域负荷无功功率裕度、多馈入直流短路比、新能源多场站短路比的计算，按照指标筛选长期电压稳定待筛选故障集。

6.2.5 功率裕度反映了交流系统的无功储备和电压支撑能力，短路比用于衡量直流或新能源场站所连接交流系统的强弱。长期电压稳定待筛选故障集中的故障应包括：

- a) 故障后运行方式的潮流不收敛；
- b) 区域负荷有功功率裕度或区域负荷无功功率裕度小于 5%；
- c) 多馈入直流短路比小于 3；
- d) 新能源多场站短路比小于 3。

7 暂态电压稳定故障筛选

7.1 筛选指标

7.1.1 暂态电压稳定判据

在电力系统受到大扰动后的机电暂态过程中，负荷母线电压应在 10s 以内恢复到 0.80pu 以上。

7.1.2 风电场低电压和高电压穿越要求

图 1 为风电场低电压和高电压穿越要求曲线。

风电场的低电压穿越要求：风电场并网点电压跌落，当风电机组并网点电压处于图示曲线 1 及以上区域时，要求风电机组不脱网连续运行。

风电场的高电压穿越要求：风电场并网点电压升高，当风电机组并网点电压处于图示曲线 2 及以下区域时，要求风电机组不脱网连续运行。

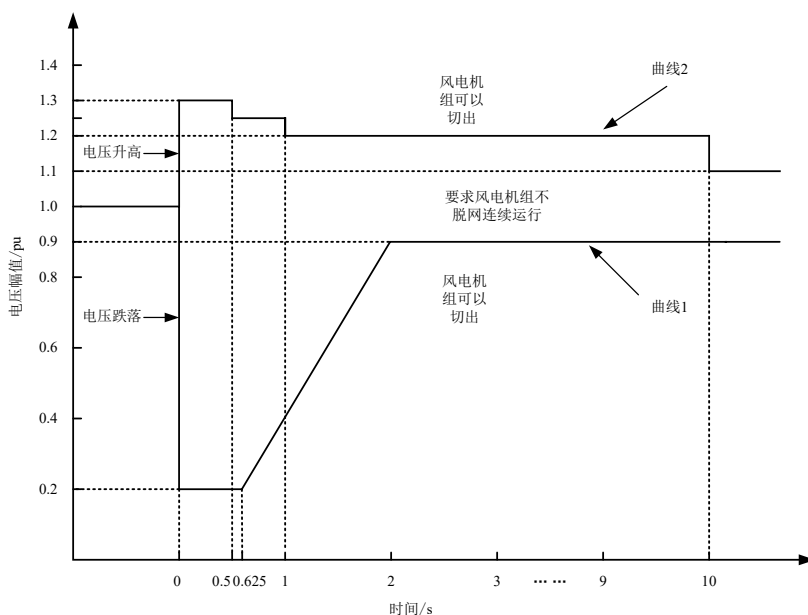


图1 风电场低电压和高电压穿越要求曲线

电力系统发生不同类型故障时，若风电场并网点考核电压全部满足低电压穿越要求和高电压穿越要求，风电机组应保证不脱网连续运行；否则，允许风电机组切出。

7.1.3 光伏电站低电压穿越要求

图 2 为光伏电站应满足的低电压穿越要求：

- a) 光伏电站并网点电压跌至 0 时，光伏电站能不脱网连续运行 0.15s；
- b) 光伏电站并网点电压跌至曲线 1 以下时，光伏电站可以从电网切出。

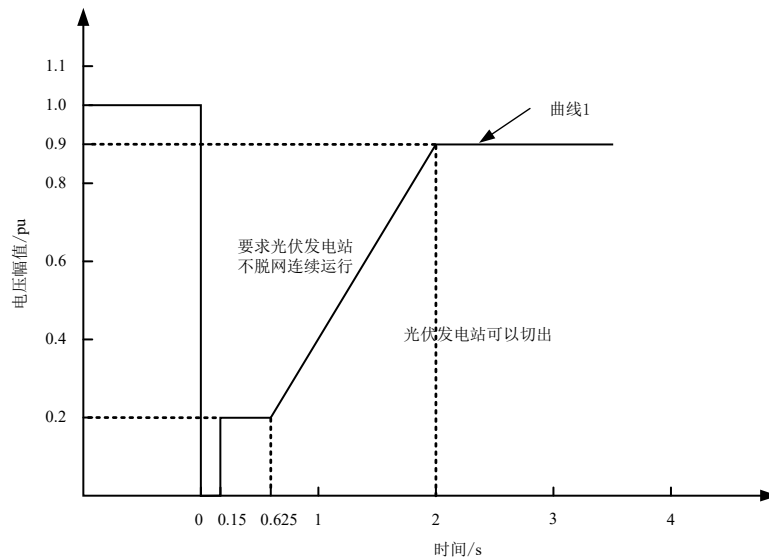


图2 光伏电站低电压穿越要求曲线

电力系统发生不同类型故障时，若光伏电站并网点考核电压全部满足光伏电站低电压穿越要求，光伏电站应保证不脱网连续运行；否则，允许光伏电站切出。

7.2 筛选方法

7.2.1 应采用可详细模拟电力系统暂态过程的仿真计算程序，对于大容量直流落点电网，直流响应特性对系统电压稳定性影响较大时，可采用机电-电磁暂态混合仿真或全电磁暂态仿真校验。仿真模型包括发电机及其控制系统模型、负荷模型、直流模型、新能源模型、灵活交直流输电设备模型、保护及安全自动装置模型等。

7.2.2 同步发电机应采用计及阻尼绕组的次暂态电势变化的详细模型。隐极发电机（汽轮发电机）宜采用5阶次或6阶次暂态电势变化模型，凸极发电机（水轮发电机）宜采用5阶次暂态电势变化模型，同步调相机应按无机械功率输入的发电机处理。

7.2.3 应计及发电机组的励磁系统及其附加控制系统的作用。励磁系统及其附加控制系统的模型应根据实际装置的调节特性，选用适当的标准仿真模型，其参数宜采用实测参数或同类型系统的实测参数。对于特殊的励磁系统可根据其情况采用自定义模型。应计及机组的原动机及其调节系统，参数宜采用实测参数或制造厂家提供的出厂参数。

7.2.3 负荷应采用ZIP与异步电动机的组合模型、考虑配电网阻抗的综合负荷模型、考虑分布式电源的负荷模型等可详细模拟负荷暂态特性的模型。

7.2.4 直流输电系统应采用包含各种控制环节的准稳态模型或更为详细的电磁暂态模型；直流输电的参数宜采用实测参数或制造厂家提供的出厂参数。

7.2.5 应对风电场、光伏电站进行新能源场站级建模。对单个风电场可采用详细或等值模型，风电场等值模型应能较好地反映风电场的动态特性；对光伏发电系统可采用详细或等值模型，光伏等值模型应能较好地反映光伏电站的动态特性。风电场及光伏电站中若含有静止无功补偿器（SVC）等动态无功补偿设备，应对其进行详细建模。新能源场站必要时采用考虑站内拓扑、无功补偿及场站级控制电磁暂态等值模型。

7.2.6 柔性直流输电系统、静止无功发生器（SVG）、可控串联补偿装置（TCSC）、统一潮流控制器（UPFC）等灵活交直流输电设备应采用机电暂态模型或更为详细的电磁暂态模型。

7.2.7 应根据联锁切机、快速压出力（快关）、联锁切负荷、高频切机、低频自动减负荷、低压自动减负荷、电厂失步解列、电网事故解列（包括快速解列、低压解列等）等装置的实际动作时间，以及电力电子装置的控制规律，进行仿真计算。

7.2.8 应对预想故障集分别进行仿真计算，基于暂态电压稳定判据，长期电压稳定判据，风电场低电压和高电压穿越要求，光伏电站低电压穿越要求，筛选长期电压稳定待筛选故障集。

7.2.9 长期电压稳定待筛选故障集中的故障应包括：

- a) 在电力系统受到大扰动后的机电暂态过程中，负荷母线电压满足暂态电压稳定判据要求，但是负荷母线电压不能保持或恢复到0.90pu以上；
- b) 在电力系统受到大扰动后的机电暂态过程中，负荷母线电压满足暂态电压稳定判据要求，但是发电机保持过励；
- c) 风电场并网点考核电压不能全部满足低电压穿越要求或高电压穿越要求；
- d) 光伏电站并网点考核电压不能全部满足光伏电站低电压穿越要求。

7.2.10 暂态电压严重故障集中的故障应包括：

- a) 在电力系统受到大扰动后的机电暂态过程中，负荷母线电压不满足暂态电压稳定判据要求。

8 长期电压稳定故障筛选

8.1 筛选指标

8.1.1 长期电压稳定判据

在电力系统受到大扰动后的长期过程中，负荷母线电压应保持或恢复到0.90pu以上。

8.2 筛选方法

8.2.1 应采用可详细模拟电力系统长期动态过程的仿真计算程序，仿真模型除考虑快速动作的元件外，还应计及过励限制、定子过流保护等发电机调节控制系统的影响，有载调压变压器的分接头、自动发电控制装置、自动电压控制装置的动作特性，以及负荷的功率恢复特性及其低电压失稳特性等。同时，还应考虑故障发展过程中的人为干预、继电保护误动、拒动及负荷的动态行为等。

8.2.2 应对长期电压稳定待筛选故障集分别进行仿真计算，基于长期电压稳定判据、风电场低电压和高电压穿越要求、光伏电站低电压穿越要求，筛选长期动态电压严重故障。

8.2.3 长期动态电压严重故障集中的故障应包括：

- a) 在电力系统受到大扰动后的长期过程中，负荷母线电压不满足长期电压稳定判据要求；
- b) 风电场并网点考核电压不能全部满足低电压穿越要求或高电压穿越要求；
- c) 光伏电站并网点考核电压不能全部满足光伏电站低电压穿越要求。

9 控制决策

9.1 控制目标

为防止电力系统出现扰动后，无功功率短缺或过剩，某些节点的电压降低或升高到不允许的数值，甚至可能出现电压崩溃或威胁设备安全，应采取电压控制措施使电压保持在允许范围内。

9.2 控制措施

应根据扰动情况，设置限制电压降低或升高的稳定控制措施，包括发电机强励、投入电容补偿装置或强行补偿等增发无功的措施，切除并联电抗器、切负荷等降低无功需求的措施，以及切除并联电容器等减少无功源的措施。

9.3 计算方法

针对暂态电压严重故障集和长期动态电压严重故障集，应采用可详细模拟电力系统长期动态过程的仿真计算程序进行仿真，将在电力系统受到大扰动后的暂态和长期过程中，不满足要求的负荷母线电压，风电场并网点考核电压和光伏电站并网点考核电压作为被控变量。

宜将限制电压降低或升高的稳定控制措施，包括发电机强励、投入电容补偿装置或强行补偿等增发无功的措施，切除并联电抗器、切负荷等降低无功需求的措施，以及切除并联电容器等减少无功源的措施作为控制变量。

可通过轨迹灵敏度建立二次规划优化模型，求取使被控变量符合要求的控制变量。

大规模新能源接入电网，尤其弱送端电网，电压支撑能力弱，电压控制灵敏度高，在新能源大出力运行方式下，扰动后易发生电压问题，应以最小控制使动态电压满足要求。

宜以投入控制量代价最小作为控制目标函数，按公式（3）。

$$J = \min \{ \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u} \} \quad (3)$$

式中，

\mathbf{R} —— 预先设置的代价权重矩阵；

\mathbf{u} —— 控制变量向量；

$\Delta \mathbf{u}$ —— 控制变量向量变化量。

建立使电压协调恢复的约束，通过调整控制变量，使被控变量在电网扰动后的暂态和长期过程中恢复并满足要求，其计算按公式（4）。

$$\begin{cases} U_{t,i}^{\min} - U_{t,i} \leq \frac{\partial U_{t,i}}{\partial \mathbf{u}^T} \Delta \mathbf{u} \leq U_{t,i}^{\max} - U_{t,i} \\ \Delta \mathbf{u}^{\min} \leq \Delta \mathbf{u} \leq \Delta \mathbf{u}^{\max} \\ \mathbf{u}^{\min} \leq \Delta \mathbf{u} + \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中：

$U_{t,i}$ —— t 时刻节点 i 的电压被控变量（pu）；

$U_{t,i}^{\min}$ ， $U_{t,i}^{\max}$ —— t 时刻节点 i 的电压上限和下限（pu）；

$\frac{\partial U_{t,i}}{\partial \mathbf{u}^T}$ —— t 时刻节点 i 的电压相对于控制变量向量的轨迹灵敏度；

$\Delta \mathbf{u}^{\max}$ ， $\Delta \mathbf{u}^{\min}$ —— 控制变量变化向量的上下限；

\mathbf{u}^{\min} ， \mathbf{u}^{\max} —— 控制变量向量的上下限。

轨迹灵敏度计算宜采用以下过程：分别仿真计算控制变量动作和不动作条件下的被控变量响应，以所述两种条件下的被控变量响应的差值作为被控变量相对于控制变量的轨迹灵敏度。

可挑选多个时刻的节点电压进行约束，使动态电压被控制在满足要求的范围内。

如果一次优化不能使被控变量满足要求，可在上一次控制变量投入的基础上再次计算轨迹灵敏度并建立优化模型，求取新的控制变量，直至被控变量满足要求。

10 故障筛选和控制决策系统

应建立长期动态电压故障筛选和控制决策系统，筛选故障，并针对暂态电压严重故障集和长期动态电压严重故障集进行控制决策计算。

图 3 为长期动态电压故障筛选和控制决策系统功能架构，包括了仿真数据生成和接入、预想故障集生成、静态电压稳定故障筛选、暂态电压稳定故障筛选、长期电压稳定故障筛选、针对暂态电压严重故障集和长期动态电压严重故障集的控制决策计算等功能。

仿真数据应包括电力系统接线和运行方式、电力系统各元件及其控制系统的模型和参数、负荷模型和参数。电力系统各元件应包括发电机及其控制系统、直流输电系统、新能源场站、灵活交直流输电设备、保护及安全自动装置模型。应进行多源数据整合，提高仿真数据质量和实时性，充分利用在线数据资源和离线数据资源，形成一套详细、参数完整、拓扑网络与实际相符、发电负荷实时更新、潮流能反映实时工况的电网模型数据，为电网潮流计算、稳定计算提供数据基础。

预想故障集生成、静态电压稳定故障筛选、暂态电压稳定故障筛选、长期电压稳定故障筛选、控制决策计算等功能的计算流程详见第 6、7、8、9、10 节。

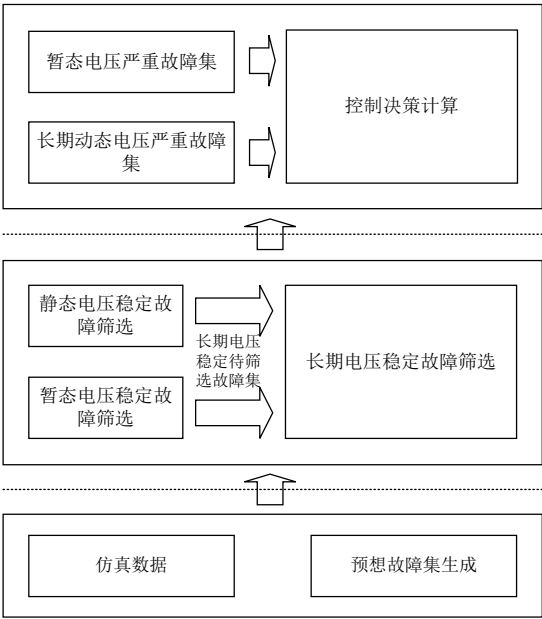


图 3 长期动态电压故障筛选和控制决策系统功能架构

