

基于场量梯度的快照分区 POD 降阶计算方法

杨帆¹, 张澍镗¹, 何永胜², 王鹏博¹, 姜慧¹

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015)

摘要: 随着数字化电力系统的不断发展, 对高价值电力装备数字孪生模型的研究成为热点。为满足计算的时效性, 通常采用模型降阶的方法, 其中本征正交分解法(proper orthogonal decomposition, POD)是最为常用的方法之一。传统的 POD 方法在构造快照时无法高效提取网格节点信息, 造成大的计算量、存储资源浪费。为此, 该文提出基于场量梯度的快照分区 POD 降阶计算方法, 以快照中各节点场量梯度为依据对计算域进行分区处理, 通过对不同分区的节点数量进行不同程度的缩减, 实现了高效的 POD 降阶计算。以换流变阀侧套管极性反转电场作为算例, 对该文提出分区降阶方法的可行性及高效性进行了验证。研究结果显示: 相较于有限元方法, 计算时间缩短 97.1%, 同时相较于传统的 POD 方法, 其快照中节点数量减少 95.2%, 节约存储资源 91.7%。同时, 分区降阶计算的准确率高, 平均误差仅为 0.80%, 实现了对阀侧套管极性反转电场的高效计算。

关键词: 模型降阶方法; 本征正交分解法; 场量大梯度; POD 快照; 换流变; 阀侧套管

Snapshot Partition POD Order Reduction Calculation Method Based on Field Gradient

YANG Fan¹, ZHANG Lianqiang¹, HE Yongsheng², WANG Pengbo¹, JIANG Hui¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China)

Abstract: With the continuous development of digital power systems, research on digital twin models of high-value power equipment has become a hot topic. In order to save computing resource, model reduction methods are usually used, among which proper orthogonal decomposition (POD) is one of the most commonly used methods. The traditional POD method cannot efficiently extract grid node information when constructing snapshots, resulting in a large amount of calculation and waste of storage resources. So, this paper proposes a snapshot partition POD method based on field gradient. The calculation domain is partitioned based on the field gradient of each node in the snapshot. By reducing the number of nodes in different partitions to various degrees, efficient POD calculation is achieved. The polarity reversal electric field of the bushing on the converter transformer valve side is used as an example to verify the feasibility and efficiency of the partition reduction method proposed in this paper. The research results show that, compared with the finite element method, the calculation time is shortened by 97.1%. Compared with the traditional POD method, the number of nodes in the snapshot is reduced by 95.2%, saving 91.7% of storage resources. At the same time, the accuracy of the partitioned reduced-order calculation is high, with an average error of only 0.80%, which realizes the efficient calculation of the polarity reversal electric field of the valve-side casing.

Key words: model reduction; proper orthogonal decomposition; large field gradient; POD snapshot; converter transformer; valve-side busing

0 引言

电力装备的数字孪生是高度集成装备物理模型及运行历史等数据, 集成多学科、多物理量的仿真过程, 通过在虚拟空间中完成映射, 从而反映相对应实体装备的运行状态^[1-6]。其中, 对电力装备物

理场的仿真计算是获取其运行状态的关键^[7-9]。然而, 传统数值计算方法的网格剖分极为细致, 计算耗时极长^[10]; 同时, 数字孪生模型需要大量的基于网格粒度导出的仿真结果数据、历史运行数据, 这些数据占用大量存储空间, 引起对计算、存储资源的浪费。

传统计算方法存在以下两个问题有待解决: 1) 计算速度缓慢。2) 数据存储空间大。为解决计算时效性的问题, 通常采用基于降阶模型(reduced order

model, ROM)的方法。其中本征正交分解方法(proper orthogonal decomposition, POD)及其改进方法是广泛应用的方法之一^[11-12]。POD方法通过全阶模型获取快照数据集,构造出一组低维正交基来表示原高维快照数据的特征,以达到降低数据维度的效果,实现对主要信息的高效提取。POD方法在关键电力装备如变压器^[13-15]、套管^[16]中已有一定研究,大幅缩减了计算时长。

然而传统的POD方法仍未解决第2个问题,即数据存储占用极大:在构造POD快照时,往往选取整个计算域、全周期的网格节点数据,其中大量区域内节点数值差异极小,由这些节点组成的快照难以反映区域性的场量差异特征,在网格剖分细致的前提下,这些密集节点还会大量占用数据存储资源。通过对网格进行粗化剖分处理,能够减少快照中上述节点数量,但此方法仅能被应用于单一物理场计算,在涉及多场计算时需进行多次网格剖分、计算,费时费力。

因此,本文提出基于场量梯度的快照分区POD降阶计算方法。在不改变网格剖分的前提下,通过全阶模型获取各节点的几何、场量及场量梯度信息,以其场量梯度作为依据对快照进行分区,通过缩减场量较小梯度分区的节点数量,大幅减少快照中节点数量,实现高效的降阶计算。

换流变阀侧套管作为直流输电系统的关键装备,其结构与电气环境具有一定的特殊性:换流变阀侧套管长径比极大,电容芯子尾部及极板尖端狭小,承受复合电压,导致其绝缘结构特殊,运行环境恶劣,其故障报道屡见不鲜^[17-19],对其物理场计算已有较多研究。文献[20-23]基于有限元方法对阀侧套管的主绝缘电场建立了数值计算模型,实现了对套管复杂电压激励下电势、电场强度的计算;文献[24-25]构建了套管稳态下的套管温度场分布计算。然而,基于有限元方法的计算模型难以满足数字孪生高效、快速的要求,因此本文将提出的分区降阶方法应用到阀侧套管的电场降阶计算上,基于实际算例验证分区降阶方法的可行性和高效性。

综上所述,本文提出了基于场量梯度的POD快照分区降阶计算方法,以场量梯度大小作为节点信息含量多少的依据,将快照分为数个区域,缩减场量梯度较小区域节点的数量。以换流变阀侧套管极性反转电场降阶为例,将分区降阶计算误差、数据量大小以及计算时长与传统POD方法比较,讨

论了该方法在工程中的实际应用价值。

1 传统本征正交分解降阶方法

本征正交分解(POD)是常用的降阶算法之一。本文基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)构建POD正交基。POD方法首先通过全阶模型计算获取快照,并基于奇异值分解将快照矩阵分解为多个时间函数和正交基的组合,将其中数个时间函数、正交基组重构得到一个与原快照矩阵近似的矩阵,其步骤如图1所示。

首先基于全阶模型得到节点信息矩阵 \mathbf{P} ,其中包含各网格节点的几何参数信息与各节点在整个计算周期中的场量值。若计算时步为 m ,则 \mathbf{P} 可以表示为:

$$\mathbf{P} = [(x, y), \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_m] \quad (1)$$

$$(x, y) = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)]^T \quad (2)$$

式中: (x, y) 表示节点的几何信息;列向量 \mathbf{a}_i 表示 t_i 时刻下模型中所有节点场量计算数值,若总节点数为 n ,其编号为1至 n ,则对于某节点其编号与行数对应。 \mathbf{a}_i 的表达式为:

$$\mathbf{a}_i = [(E_i)_1, (E_i)_2, \dots, (E_i)_n]^T \quad (3)$$

式中: $(E_i)_n$ 为编号 n 节点 t_i 时刻场量。快照 \mathbf{A} 在节点信息矩阵 \mathbf{P} 的基础上减去表示节点几何信息的 (x, y) ,仅保留节点计算数值信息,因此快照 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_m] \quad (4)$$

将 \mathbf{a}_1 分解为时间和空间上独立的两部分,以其乘积来表示电场强度向量 \mathbf{a}_1 ,其表达式为:

$$\mathbf{a}_1 = \sum_{i=1}^m s_i \varphi_i \quad (5)$$

式中: $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m]$ 为1组正交基; s_i 为与其对应的时间函数。在POD方法中,需要构造1组维数

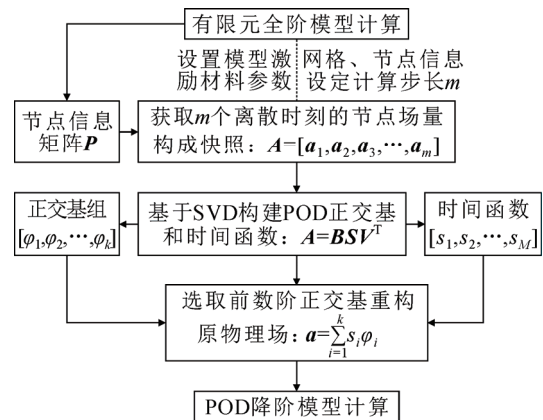


图1 POD方法流程图

Fig.1 POD method execution process

更低的正交基 $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k]$ ($k < m$), 以此降低矩阵运算维数, 达到降阶的目的。

SVD 分解下快照矩阵的方法构建 POD 正交基组 $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k]$ 。对矩阵 A 的 SVD 如图 2 所示。

其中, A 为电场快照矩阵($M \times N$), 其分解结果中 B 与 V 都为实对称矩阵, 其中 B 为 $M \times M$ 矩阵、 V 为 $N \times N$ 方阵, 又称 POD 模态系数矩阵, 而 S 为 $M \times N$ 矩阵, 其除主对角线上外的元素均为 0, 主对角线上的每一个元素均为奇异值, 且由大到小排序, 即 $S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_M)$ 。通过 SVD 得到的矩阵 B 中的列向量 b 即为正交基(即 POD 模态), 其对应的奇异值 s 即为其时间函数, 因此取前 k 维正交基 $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k]$, 其对包含的能量计算式如下:

$$e_k = \frac{s_k}{\sum_{k=1}^M s_k} \quad (6)$$

奇异值的大小表示其对应正交基能量占比的多少, 即包含信息的多少。基于选取的前 k 个及其对应的奇异值计算原电场快照列向量 a , 从而起到重构原电场快照矩阵 A 的目的:

$$a = \sum_{i=1}^k s_i \varphi_i \quad (7)$$

选取的前 k 个奇异值所对应的主成分作为简化后的电场强度的正交基, 由于通常选取的 $k \ll m \ll n$, 大幅降低了计算量, 达到降阶的目的。

2 基于场量梯度分区的 POD 快照构造

在电力装备多物理场计算中, 存在大量区域内节点计算数值相近或为一定值, 在数学上体现为节点场量梯度数值较小。因此, 传统 POD 方法在基于所有网格节点数据构造快照时, 包含大量低效信息, 无法实现对全阶模型场量信息的高效提取, 需要减少快照中低效节点的数量。

因此本文提出基于场量梯度分区的 POD 快照构造方法, 其原理如图 3 所示。以各节点场量梯度大小作为其包含信息多少的依据, 将计算域分为 3 类区域: 1) 场量大梯度区。其节点的计算数值在一定的几何区域内变化较大, 邻近节点场量数值相差极大, 欲准确提取该区域场量分布信息需要快照包含该区全部节点。2) 场量定值区。场量定值区往往为全阶模型计算中设置的激励或特殊条件区域, 这些区域的场量为 0 或一定值, 局部节点场量数值几乎无差异, 因此为节省计算、存储资源, 每个区域

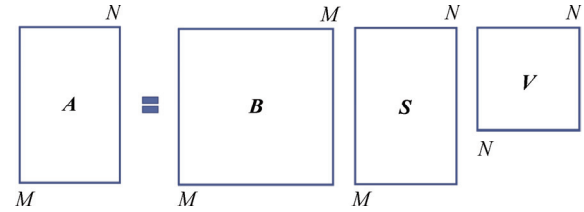


图 2 对矩阵 A 进行 SVD 的结果

Fig.2 Result of SVD of matrix A

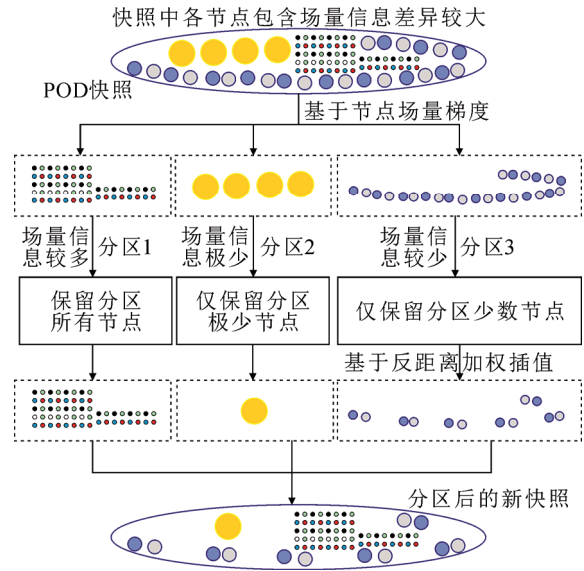


图 3 基于场量梯度分区的 POD 快照构造原理

Fig.3 POD snapshot construction principle based on field gradient partitioning

在快照中仅保留一个节点作为代表。3) 场量小梯度区。其节点的场量数值在一定几何区域内变化较小, 邻近节点场量数值相差极小, 要提取该区域场量分布信息只需考虑较少的节点。为减小误差, 基于反距离加权插值方法缩减低效区域的节点数。基于缩减节点后的 3 个分区重新组合, 形成新的 POD 快照, 进行后续的降阶计算流程。

基于场量梯度分区的 POD 快照构造方法具体流程如图 4 所示。首先基于对全阶模型的计算获取节点信息矩阵 P 、网格信息矩阵 T 及节点平均梯度信息矩阵 G 。节点信息矩阵 P 的表达式如式(1)所示; 以三角形网格为例, 网格信息矩阵 T 表示为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n-2 & n-1 & n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: 矩阵每行 3 个元素为组成一个网格的节点编号。由于节点编号对应矩阵 P 的行数, 由此可知节点间的连接关系。

节点平均梯度信息矩阵 \mathbf{G} 表达式为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} (x_1, y_1) & g_1 \\ (x_2, y_2) & g_2 \\ \vdots & \vdots \\ (x_n, y_n) & g_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: (x, y) 如式(2)所示表示各节点的几何参数; g_i 为编号 i 节点的场量梯度数值在 m 个计算时间步长下的平均值。

根据实际计算需求, 设定场量梯度标准值 g' , 基于 \mathbf{G} 中各节点场量梯度数值大小将 \mathbf{G} 分为 3 个区。1) 所有场量梯度数值大于等于场量梯度标准值的节点划分为场量大梯度区 \mathbf{G}_1 。2) 基于全阶模型, 获取所有场量为定值的区域, 在这些区域中的节点划分为场量梯度定值区 \mathbf{G}_2 。3) 剩余的节点划分为场量小梯度区 \mathbf{G}_3 , 这些节点的场量梯度数值在 0 和 g' 之间。若场量梯度数值大于等于 g' 的节点有 i 个, 场量梯度为定值区域的节点 j 个, 则节点梯度信息矩阵 \mathbf{G} 的分区如图 5 所示。

保留所有场量大梯度区 \mathbf{G}_1 的节点, 对低效的场量定值区 \mathbf{G}_2 和场量小梯度区 \mathbf{G}_3 的节点进行缩减: 对于场量定值区 \mathbf{G}_2 , 其节点包含的信息最少, 每一个区域仅保留一个节点, 形成缩减后的分区 \mathbf{G}_2' , 因此 \mathbf{G}_2' 内的节点数量等于全阶模型中的场量为定值的区域个数。由于在矩阵 $\mathbf{G} \rightarrow \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{A}$ 中节点为一一对应的关系, 因此基于 \mathbf{G}_1 、 \mathbf{G}_2' 得到 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2' 。

而对于场量小梯度区 \mathbf{G}_3 , 若采取与 \mathbf{G}_2 区一致的尺度大幅缩减节点, 则会造成较大的计算误差, 因此基于反距离加权插值方法对 \mathbf{G}_3 区域的节点数量进行缩减, 其流程如图 6 所示。基于前述的网格信息矩阵 \mathbf{T} , 可获取节点在网格中的邻近关系。以节点编号顺序遍历 \mathbf{G}_3 中的节点, 以其所有邻近节点场量为样值, 计算其权重如式(10)。

$$w_n = \frac{1}{d_n^2} \quad (10)$$

式中: w_n 为某邻近节点 n 的插值权重; d_n 为该点到被插值节点的几何距离, 由 \mathbf{G} 中的 (x, y) 计算。邻近节点 n 到被插值节点的距离越短, 其权重就越大, 对被插值节点场量的影响就越大。计算该节点场量反距离加权插值 E'_i 如式(11)所示:

$$E'_i = \frac{\sum_{n=1}^N w_n E_n}{\sum_{n=1}^N w_n} \quad (11)$$

式中: E'_i 为节点 i 插值得到的场量值; E_n 为邻近节点 n 的场量值。将 E'_i 作为该节点的插值场量, 并删

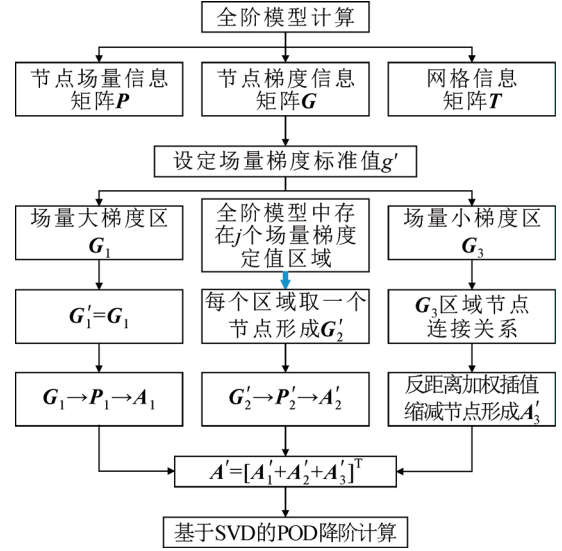


图 4 基于场量梯度分区的 POD 快照构造流程

Fig. 4 POD snapshot construction process based on field gradient partitioning

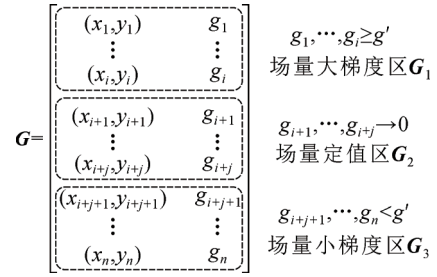


图 5 节点梯度信息矩阵 \mathbf{G} 的分区

Fig. 5 Partition of node gradient information matrix \mathbf{G}

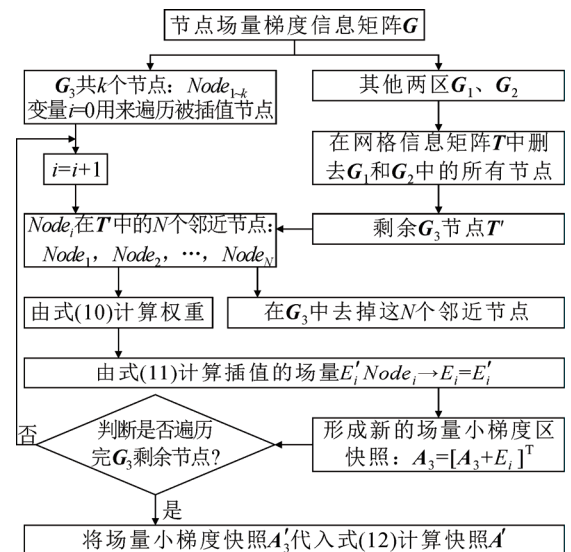


图 6 基于反距离加权插值的 \mathbf{G}_3 区节点缩减流程

Fig. 6 \mathbf{G}_3 area node reduction process based on inverse distance weighted interpolation

去所有邻近节点。如此仅保留被插值的节点, 每个节点以插值结果作为其新的场量值, 以此获得该区域快照 A'_3 , 基于对 3 个分区节点不同程度的缩减, 形成的分区快照 A' 为:

$$A' = A_1 + A'_2 + A'_3 \quad (12)$$

将分区快照 A' 代入式(4), 即可进行基于分区的 POD 降阶计算。

3 阀侧套管极性反转电场分区降阶验证

换流变阀侧套管在运行过程中, 存在极性反转工况等直流输电系统特有的工况, 套管电场强度出现局部极大值和场量大梯度现象, 对装备绝缘性能是极大的考验, 有较大的研究价值。本文以某 500 kV 换流变阀侧套管模型为例, 对其极性反转电场进行基于场强梯度的快照分区 POD 降阶计算, 验证了该方法的可行性及高效性。

3.1 模型建立

某 500 kV 换流变阀侧套管几何模型如图 7 所示。其中, 套管长 4 190 mm, 半径 150 mm; 电容芯子极板层数为 31 层, 其中极板厚度 2 mm, 首层极板长 3 390 mm, 末屏极板长 1 770 mm。电容芯子极板层与层之间插入铝箔, 二者共同起到均衡套管径向电场分布的作用, 套管内充 SF₆ 气体作为绝缘介质, 电容芯子法兰以下部分浸没在变压器油中。对模型进行有限元剖分, 其网格节点总数 201 270, 如图 8 所示。套管中心导杆、各均压球为高电位, 施加极性反转电压激励 387.6 kV, 如图 9 所示。电容芯子极板最外层(即末屏极板)、法兰及变压器升高座外壳为接地电位。模型中材料参数如表 1 所示。

采用有限元软件对 500 kV 换流变阀侧套管极性反转电场模型进行仿真计算, 得到套管电场强度分布如图 10(从左至右依次为 3 600、3 615、3 630、3 645、3 660 s)。在极性反转开始前(3 600 s)及结束后(3 660 s), 电场强度分布都集中在套管内部的电容芯子极板、极板尾部均压球周边及部分 SF₆ 区域, 这表明电容芯子极板与均压球强制改变了套管内绝缘的电场强度分布情况, 极板尖端、芯子尾部及均压球边缘等区域存在电场强度极大值。

3.2 基于电场强度梯度的 POD 快照分区

由第 2 章分区快照构造方法, 基于全阶模型计算节点梯度信息矩阵 G , 取场量梯度标准值 g' 为 10⁶, 以此进行分区。为便于观察, 以电场强度数值较大的 3 600 s 为例各区域电场强度梯度数值的分

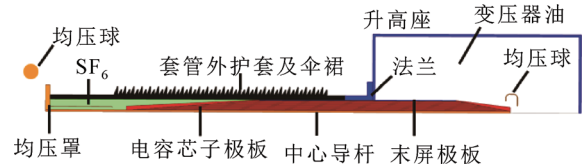


图 7 500 kV 换流变阀侧套管结构示意图

Fig.7 Structural diagram of 500 kV valve-side bushing

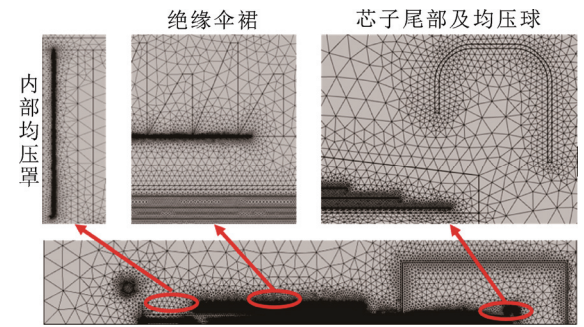


图 8 500 kV 换流变阀侧套管有限元网格模型

Fig.8 Finite element mesh of a 500 kV valve-side bushing

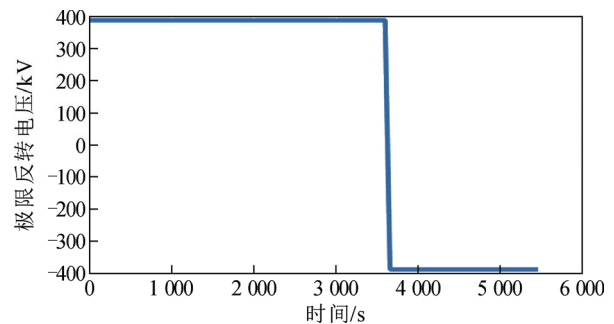


图 9 换流变阀侧套管极性反转电压波形

Fig.9 Polarity reversal voltage waveform of the valve-side bushing

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料名称	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
铜	5.8×10 ⁷	10 ¹⁰
环氧树脂	8.1×10 ⁻¹³	4.5
SF ₆	10 ⁻²⁰	1
变压器油	2×10 ⁻¹³	2.2
硅橡胶	5×10 ⁻¹³	3.6
铝	3.8×10 ⁷	10 ¹⁰
不锈钢	4.3×10 ⁶	10 ¹⁰
空气	10 ⁻²⁰	1

布如图 11 所示。

1) 场量大梯度区出现在极板尖端、电容芯子尾部、均压球边缘及绝缘伞裙根部, 这些区域出现

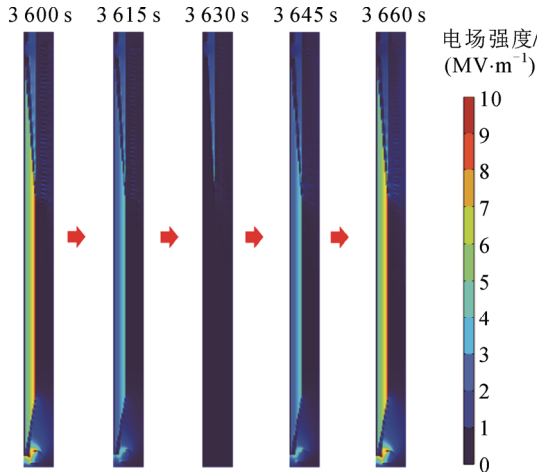


图 10 换流变阀侧套管极性反转电场强度分布

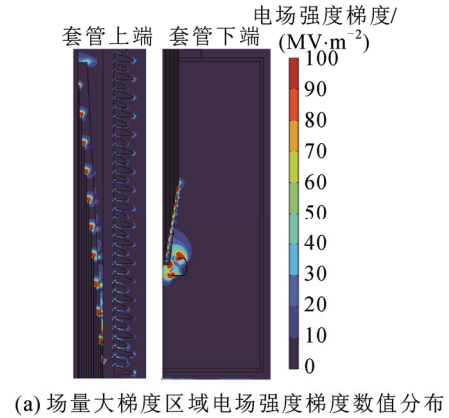
Fig.10 Polarity reversal electric field intensity distribution of valve-side bushing of converter transformer

局部电场强度极大值, 在 $8 \times 10^6 \text{ V/m}$ 至 $1.5 \times 10^7 \text{ V/m}$ 间, 其中末屏极板尖端尤为突出, 达 $1.56 \times 10^7 \text{ V/m}$, 同时该区域在几何结构上往往极为狭小, 其场强梯度数值达到 10^6 至 10^8 数量级, 如图 11(a)所示。

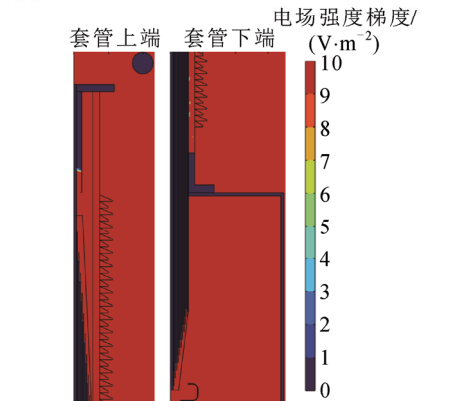
2) 场量梯度定值区出现在电容芯子极板主体、中心导杆、法兰、变压器升高座、套管顶部及各均压球。中心导杆、法兰等作为全阶模型计算中设置电压激励、接地电位的结构, 其场强为 0; 而电容芯子极板主体由于层间插入铝箔, 强制地均匀分布了其径向电场, 单看一层极板, 其内部主要区域电场强度几乎相等。因此, 电容芯子极板主体区域每一层电场强度均较大, 且层与层间电场强度数值均有差异, 而电场强度梯度均较小, 因此其内部节点归入场量梯度定值区, 如图 11(b)所示。

3) 场量小梯度区出现在空气、变压器油、芯子端部保护层、外护套及伞裙区域, 该区域有一定的电场强度分布, 但不存在电场强度局部极大值, 场强梯度数值主要在 $1 \times 10^4 \text{ V/m}^2$ 至 $1 \times 10^6 \text{ V/m}^2$ 之间, 如图 11(c)所示。

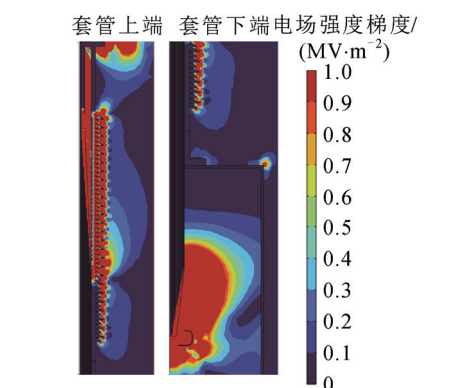
构建的分区快照节点分布如图 12 所示。经过分区并缩减 G_2 、 G_3 区域的节点数量后, 分区快照 A' 总节点数为 9 638 个, 仅为原快照 A 节点数的 4.79%, 减少了 95.2%。分区及后续缩减大大减少了快照节点数, 因此采用分区方法构造的快照文件大小仅为 31.3 MB(32 877 783 字节), 相较于传统 POD 方法构造的快照文件大小 379 MB(397,493,070 字节), 减少了 91.7%, 可知分区及后续节点缩减对数据存储量的节省效果显著。



(a) 场量大梯度区域电场强度梯度数值分布



(b) 场量梯度定值区电场强度梯度数值分布



(c) 场量小梯度区电场强度梯度数值分布

图 11 3 600 s 时套管电场强度梯度数值分区

Fig.11 Gradient distribution of electric field intensity in 3 600 s

3.3 基于分区的 POD 降阶计算及电场重构

采用 MATLAB 2021a 软件对分区方法构建的快照矩阵进行奇异值分解, 得到前 4 阶模态如图 13 所示, 根据式(6)对正交基能量占比(即信息含量)进行计算, 得到模态数与其能量的关系如图 14、图 15 所示。可知前 4 阶模态总能量占比接近 1, 这意味着前 4 阶模态可涵盖全阶模型绝大部分信息, 证实了本文方法的合理性。通过式(7)计算由前 4 阶模态重构得到的电场。为了便于观察, 展示 3 600 s 及 3 660 s 两个时刻下的全阶电场、重构电场及二者

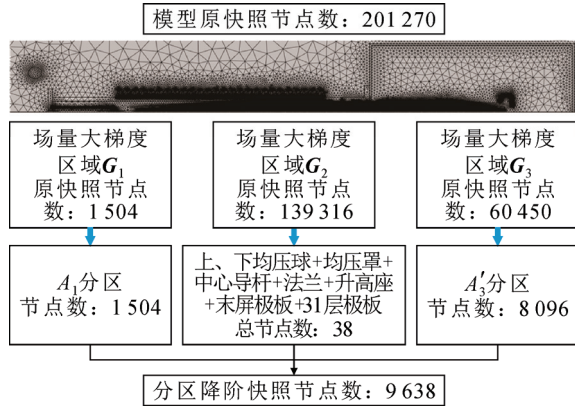


图 12 基于场量梯度分区的快照构造

Fig.12 Snapshot based on field gradient partitioning



图 13 前 4 阶模态示意图

Fig.13 Diagram of the first four modes

差值, 如图 16 所示。由此可知降阶并重构的电场相较于全阶模型并无明显差异, 可认为降阶模型较好地提取了阀侧套管极性反转电场的主要特征。

为验证分区降阶计算的高效性, 基于 CPU i5-10400, 2.90 GHz, 内存 16 G 的设备进行计算, 并对比了全阶模型仿真计算、传统 POD 降阶计算及本文的分区降阶计算 3 者的数据存储大小及计算时间, 结果如表 2 所示。

基于重构电场与全阶模型电场数值误差, 验证降阶计算方法的有效性。通过定量分析降阶计算的准确度, 计算全时间步长内重构电场数值相对全阶电场数值的误差。由于 POD 快照在式(12)中被缩减为 A' , 其节点数远小于原快照 A 的节点数 n , 因此无法直接相减比较。因此在计算降阶误差时, 需要对 A' 中各分区被缩减的节点进行添加并赋值, 形成节点数量也为 n 的矩阵 A'' :

$$A'' = A_1 + A_2 + A_3 \quad (13)$$

由式(4)得, A'' 也可表达为由 a 组成的形式:

$$A'' = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_m] \quad (14)$$

对节点数量进行添加并赋值, 其中矩阵 A'' 中电场强度值表示为 E'' 。场量大梯度区的节点没有缩减, 场量定值区、场量小梯度区补充节点数量。场

表 2 分区降阶方法与传统方法的对比

Table 2 Comparison between partition order reduction method and traditional method

方法	自由度	快照数据存储大小	计算时间/s
全阶模型	792 575		379
传统 POD	4	397 493 070 字节, 约为 379 MB	8.65
分区 POD	4	32 877 783 字节, 约为 31 MB	11.04

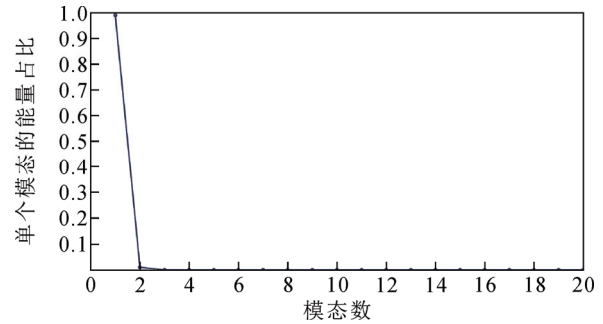


图 14 模态数量与其能量占比关系

Fig.14 Relationship between the number of modes and their energy proportions

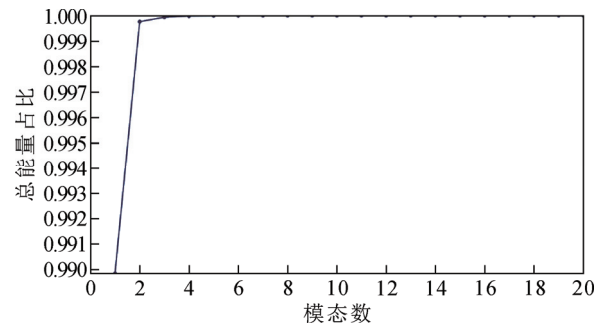


图 15 选取模态数对应的场信息包含量

Fig.15 The amount of field information contained corresponding to the number of selected modes

量定值区内, 中心导杆、法兰等区域的节点赋值为 0; 在电容芯子极板主体区域的节点赋值为该层极板场强数值。而在场量小梯度区, 补充图 6 中节点 $Node_i$ 被删去的 N 个相邻节点 $Node_1 \sim Node_N$, 由式(11)将其场量赋值为:

$$E_1'' = E_2'' = \dots = E_N'' = E_i' \quad (15)$$

则 t 时刻降阶误差 e 的计算式为:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n (|(E_t)_i - (E_t'')_i| \cdot I(a))}{n} \times 100\% \quad (16)$$

式中: $I(a)$ 为非零指示函数。

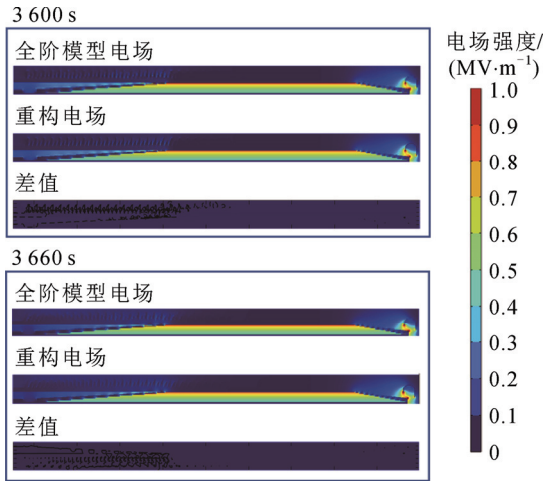


图 16 重构电场与全阶电场及其差值对比

Fig.16 Comparison of reconstructed electric field and full-order electric field and their differences

$$I_{(a)} = \begin{cases} \frac{1}{(E_t)_i}, & (E_t)_i \neq 0 \\ 0, & (E_t)_i = 0 \end{cases} \quad (17)$$

极限反转期间的降阶误差计算结果如图 17 所示。可知重构电场的最大误差出现在极性反转的第 1 s, 为 5.95%; 后续误差较小, 较大误差出现在极性反转第 32 s, 为 2.55%。整个降阶模型计算结果平均误差为 0.80%, 最大误差为 5.95%, 处于可接受范围内。由此可知快照分区的降阶计算在大幅减少了数据存储压力的同时保证了计算精度。

综上所述, 本文提出的方法在应用到 500 kV 换流变阀侧套管的电场降阶计算时, 基于全阶模型获取其节点场量及其梯度信息, 基于节点场量梯度大小将 POD 快照分为 3 个区域。通过减少快照中的场强梯度较小分区的节点数, 大大减小了计算模型的数据存储量和计算量。由降阶模型重构的电场高效还原了原电场的分布特征, 同时相较于有限元仿真计算的误差较小、计算耗时、数据量大大减小, 有着良好的工程应用价值。

4 结论

本文提出一种基于场强梯度数值对全阶模型快照进行分区的 POD 降阶计算方法, 并结合 500 kV 换流变阀侧套管极性反转电场降阶的算例进行验证, 得到以下结论:

1) 本文提出的基于场量梯度的快照分区 POD 降阶计算方法, 基于全阶模型获取网格节点的场量、场量梯度及几何连接信息, 以其场量梯度为依据将

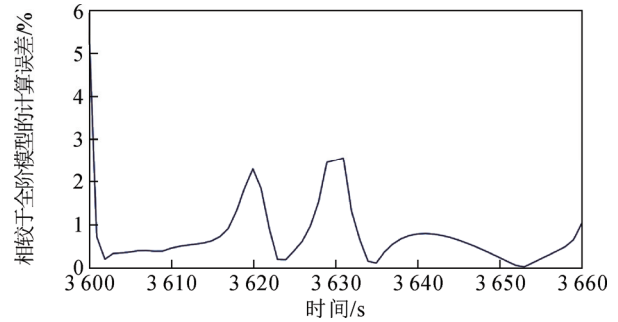


图 17 分区降阶方法计算误差

Fig.17 Reconstructed electric field compared to full-order electric field error

快照分为 3 个区域, 基于不同尺度的缩减场量梯度较小的分区内含节点数量, 形成了分区快照。实现了在不改变网格剖分的前提下, 对模型场量信息的高效采集, 以分区快照进行奇异值分解的 POD 降阶, 大幅减少了快照文件数据大小, 实现了高效率、高质量的降阶计算。

2) 通过 500 kV 换流变阀侧套管极性反转电场模型的降阶计算进行验证: 基于本文提出的分区降阶计算方法, 将全阶模型的 201 270 个网格节点依其场量梯度数值大小分为 3 个区域, 通过节点数量缩减, 形成新的快照中节点数量仅为 9 638 个, 减少了 95.2%。相较于传统的 POD 方法, 在计算时间相近的前提下减少了快照文件的存储资源占用 91.7%。同时分区降阶较好地还原了原电场的分布特征, 其降阶计算精度较高, 平均误差仅有 0.80%, 且最大误差仅为 5.95%。

综上所述, 通过换流变阀侧套管电场降阶的实际算例, 基于场量梯度的快照分区 POD 降阶方法在节约了计算、存储资源的同时, 有着较低的计算误差。证明了本文提出的分区降阶方法具有实际工程应用的可行性、高效性, 为数字孪生在电力装备数字化转型中的应用提供了支撑。

参考文献 References

- [1] 刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.
- [2] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High

- Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [3] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971.
- [4] 杨帆, 吴涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1505-1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.
- [5] MANDOLLA C, PETRUZZELLI A M, PERCOCO G, et al. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: a case analysis of the aircraft industry[J]. Computers in Industry, 2019, 109: 134-152.
- [6] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [7] 杨帆, 郝翰学, 王鹏博, 等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.
- [8] 任卓翔, 闫帅, 陈志福, 等. 电工装备低频电磁仿真中若干关键问题研究现状及趋势[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 905-923.
REN Zhuoxiang, YAN Shuai, CHEN Zhifu, et al. State of the art and trend of several key issues in low frequency electromagnetic simulation of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 905-923.
- [9] 徐翀, 王鹏博, 杨帆, 等. 三芯电缆中间接头压接缺陷多物理场及温度梯度场分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1769-1780.
XU Chong, WANG Pengbo, YANG Fan, et al. Analysis of multi-physics field and temperature gradient field of crimping defects on intermediate joints on the three-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1769-1780.
- [10] 张施令, 彭宗仁, 杜进桥, 等. RBF神经网络与NSGA-II混合算法用于 ± 100 kV穿墙套管3维电场模拟及内屏蔽结构优化[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1847-1857.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, DU Jinqiao, et al. Three-dimensional electric field simulation and inner shielding structure optimization of ± 100 kV wall bushing with RBF neural network and NSGA-II algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1847-1857.
- [11] HENNERON T, CLÉNET S. Model-order reduction of multiple-input non-linear systems based on POD and DEI methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 7207104.
- [12] YAN S, XU X Y, LYU P F, et al. Application of POD and PGD for efficient parameter sweeping in frequency-domain full-wave problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 7507004.
- [13] 刘刚, 荣世昌, 武卫革, 等. 基于混合有限元法和降阶技术的油浸式变压器绕组2维瞬态流-热耦合场分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1695-1705.
LIU Gang, RONG Shichang, WU Weige, et al. Two-dimensional transient flow-thermal coupling field analysis of oil-immersed transformer windings based on hybrid finite element method and reduced-order technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1695-1705.
- [14] 池骋. 换流变压器的热耦合计算与模型非线性降阶研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
CHI Cheng. Thermoelectric coupling calculation and nonlinear model order reduction of converter transformer[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022.
- [15] 刘刚, 胡万君, 郝世缘, 等. 油浸式变压器绕组瞬态温升降阶快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 643-657.
LIU Gang, HU Wanjun, HAO Shiyuan, et al. Reduced order calculation method of steady temperature rise of oil immersed power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 643-657.
- [16] 王青于, 楚智霖, 程建伟, 等. 换流变阀侧套管极性反转暂态电场模型降阶[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2420-2431.
WANG Qingyu, CHU Zhilin, CHENG Jianwei, et al. Reduced order model of polarity reversal transient electric field of converter transformer valve-side bushing[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2420-2431.
- [17] 简政, 郝建, 刘清松, 等. 典型缺陷油纸绝缘套管的高压频域介电和局部放电特性差异[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4113-4123.
JIAN Zheng, HAO Jian, LIU Qingsong, et al. Difference analysis of high-voltage frequency domain dielectric and partial discharge characteristics of oil-paper insulation bushings with typical defects[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4113-4123.
- [18] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [19] TENBOHLEN S, JAGERS J, GEBAUER J, et al. Transformer reliability survey: Interim report[J]. 2012.
- [20] 张施令, 胡伟, 彭宗仁. 1100 kV特高压油气套管主绝缘及其金具附件结构校核计算[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2062-2072.
ZHANG Shiling, HU Wei, PENG Zongren. Main inner insulation of 1100 kV UHVAC oil-gas bushing and structure optimization design of its fittings[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2062-2072.
- [21] TANG H, WU G N, DENG J, et al. Electro-thermal comprehensive analysis method for defective bushings in HVDC converter transformer valve-side under multiple-frequency voltage and current harmonics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106777.
- [22] 张施令, 彭宗仁. ± 800 kV换流变压器阀侧套管绝缘结构设计分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2257-2266.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design and analysis of insulation structure of ± 800 kV valve side converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2257-2266.
- [23] 林莘, 温苗, 沈文, 等. 复杂电场作用下换流变压器套管绝缘特性分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 1-6.
LIN Xin, WEN Miao, SHEN Wen, et al. Analysis on insulation property of converter transformer bushing under complex voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 1-6.
- [24] 张施令, 彭宗仁, 刘鹏, 等. 电热耦合模型应用于干式油气套管径向温度分布计算及其试验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 289-296.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, LIU Peng, et al. Experimental study on electro-thermal coupling model applied in computation of radial temperature distribution of rip oil-gas bushing condenser[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 289-296.
- [25] 林牧, 刘凯, 王乃永, 等. 换流变阀侧套管数字孪生建模及热特性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1653-1662.
LIN Mu, LIU Kai, WANG Naiyong, et al. Establishment of digital twin model of converter transformer valve-side bushing and analysis of its thermal characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1653-1662.



YANG Fan
Ph.D., Professor



ZHANG Lianqiang
Corresponding author

杨帆

1980—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事输电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作
E-mail: yangfanqu@gmail.com

张激疆(通信作者)

1999—, 男, 硕士
主要从事电力装备数字孪生方面的研究工作
E-mail: 20173491@cqu.edu.cn