

利用增量二次规划和启发式方法的 电力系统动态无功优化

谷永刚^{1,2}, 肖凯^{1,3}, 夏经德¹, 赵登福¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西北电网有限公司, 710048, 西安;
3. 长庆钻井总公司, 710021, 西安)

摘要: 针对电力系统动态无功优化数学模型存在优化过程长、收敛稳定性差的问题, 导出了以控制变量增量为求解变量的电力系统动态无功优化的二次规划模型, 并以具有有限次迭代收敛的Lemke算法求解, 这样的动态无功优化控制计算量小, 非常适合于对计算速度和算法稳定性要求高的动态无功优化控制问题. 针对控制变量控制次数约束, 采用启发式归并方法对其进行约束限制, 有效避免了将控制变量动作次数约束纳入优化过程的复杂性. 实际算例表明, 文中方法不仅运算速度快, 且收敛稳定性好.

关键词: 动态无功优化; 二次规划; Lemke 算法; 启发式归并算法

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0106-06

Incremental Quadratic Programming and Heuristic Combination Algorithm for Dynamic Optimal Reactive Power in Power System

GU Yonggang^{1,2}, XIAO Kai^{1,3}, XIA Jingde¹, ZHAO Dengfu¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China; 3. Changqing Well Construction Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: In the mathematical model of dynamic optimal reactive power, the inefficiency and poor convergence are obvious in the optimization process. A dynamic optimal reactive power model is proposed, where the control variable increments are regarded as the unknown variables and the optimal solution is obtained in finite steps by Lemke algorithm. This dynamic optimal reactive power with a slight computation task is suitable for the higher demand of the computing rate and the algorithm stability in dynamic optimal reactive power control. As to the problem of restricted variable operation times, the heuristic combination algorithm is chosen to restrict the controllable variable and the complexity of putting the variable operation times into the optimization process is avoided. The results demonstrate that the model and method enable to shorten the computing period and obtain the optimal solution in limited steps.

Keywords: optimal reactive power; quadratic programming; Lemke algorithm; Heuristic combination algorithm

随着我国电力工业的飞速发展和电网规模的日益扩大, 电网结构日趋复杂, 对电力系统运行的电能质量、经济性和安全性也提出了更高的要求. 对电力

系统实现动态无功优化是保证电力系统运行电压的质量、降低运行中的有功功率损耗、保证电力系统安全运行的一种重要手段.

在电力系统实际运行过程中,随着一天中各母线负荷的随机变化,其运行电压和网络运行损耗也随机发生改变。为保证电力系统在运行过程中的电压质量,降低运行电能损耗,且满足一天内可调压变压器的分接头档位的变化和电容器组开关的动作数约束,将一天的负荷预测数据划分成若干个时段(如 24 段),然后以一天的总能量损耗最小或者 24 时段内总网损最小为目标,并将控制变量的动作次数作为直接约束,从而获得全天各时段的无功调度模式。

文献[1]通过控制变量的选取和动作时间的预确定,将动态优化模型转化为同普通无功优化模型相同的表达形式,提出了适用于高中压配电网的动态无功优化算法。文献[2]给出了动态无功电压优化问题中严格意义下的非线性混合整数数学模型。文献[3]建立了完整的基于非线性内点法的电力系统动态无功电压优化控制的数学模型,并对不可导的控制变量约束条件和具有离散变量的功率平衡约束条件进行了等价的可导转换。文献[4]提出新的实时动态无功优化模型,以当前时段的能损费用和各控制设备的调节代价之和最小为目标函数。文献[5]根据无功电压调节装置的动作次数限制和次日的综合负荷预测曲线,将调度周期分成几个时段,但没有明确给出各时段的划分方法,并且该文要求控制设备同时动作。文献[6]采用引入离散惩罚的非线性原对偶内点法求解时,其修正方程系数矩阵可具有箭形分块结构,可采用两种方法将其精确解耦为 25 个低维线性方程组,应用稀疏矩阵的三角分解技术可实现对它们的快速求解。

本文导出了控制变量增量的电力系统动态无功电压优化的二次规划数学模型,并采用 Lemke 算法对该模型进行求解,同时利用启发式归并算法对设备的日允许动作次数加以约束限制。算例结果表明了本文方法的有效性。

1 动态无功优化的一般数学模型

电力系统动态无功优化问题是根据未来 24 h 的负荷预测数据,决定每个时刻发电机的无功出力、各电容器组的投切状态和各可调压变压器的分接头的档位,在同时满足一天内控制变量动作次数的限定,而且各母线的电压都在给定的容许范围内的前提下,使系统一天内的总电能损耗达到最小。

1.1 目标函数

将一天中负荷划分为 24 个时段,则目标函数为

$$\min f = \sum_{t=1}^{24} \sum_i^n \Delta P_t(P_{i,t}, Q_{i,t}, U_{Gi,t}, Q_{Ci,t}, K_{i,t}) \quad (1)$$

式中: ΔP_t 为 t 时刻系统有功损耗; $P_{i,t}$ 为 t 时刻 i 节点的有功负荷; $Q_{i,t}$ 为 t 时刻 i 节点的无功负荷; $U_{Gi,t}$ 为 t 时刻 i 节点发电机的端电压; $Q_{Ci,t}$ 为 t 时刻 i 节点无功补偿装置的补偿量; $K_{i,t}$ 为 t 时刻 i 节点可调压变压器分接头档位。

1.2 约束条件

等式约束条件是各节点应满足的功率平衡条件

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{i,t} &= P_{Gi,t} - P_{Li,t} - \\ &U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_{i,t} &= Q_{Gi,t} - Q_{Li,t} - \\ &U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 为 t 时刻发电机 i 发出的有功功率; $P_{Li,t}$ 为 t 时刻负荷 i 吸收的有功功率; $Q_{Gi,t}$ 为 t 时刻发电机 i 发出的无功功率; $Q_{Li,t}$ 为 t 时刻负荷 i 吸收的无功功率; $U_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 处的电压; G_{ij} 为节点 i, j 之间的电导; B_{ij} 为节点 i, j 之间的电纳; θ_{ij} 为节点 i, j 之间的相位差。

不等式约束条件

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq K_{i,t} \leq K_{i\text{MAX}} \\ 0 &\leq N_{Ci,t} \leq N_{Ci\text{MAX}} \\ U_{\text{MIN}} &\leq U_{it} \leq U_{\text{MAX}} \\ \sum_{t=1}^{24} |C_{il,t} - C_{il,t-1}| &\leq C_{il\text{MAX}} \\ \sum_{t=1}^{24} |K_{j,t} - K_{j,t-1}| &\leq K_{j\text{MAX}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $K_{i\text{MAX}}$ 为可调压变压器的分接头最高档位; $N_{Ci,t}$ 为 t 时刻补偿节点 i 电容器的投入组数; $N_{Ci\text{MAX}}$ 为补偿节点 i 电容器的投入组数的上限; U_{MIN} 、 U_{MAX} 为 i 节点的电压值的上下限; $C_{il,t}$ 为 t 时刻 i 节点无功补偿装置第 l 台电容器的状态,它是 0-1 变量,投入为 1,未投入为 0; $C_{il\text{MAX}}$ 为节点 i 无功补偿装置第 l 台电容器全天总投切次数的限制值; $K_{j\text{MAX}}$ 为变压器 j 全天分接头变化总量的限制值。

2 电力系统动态无功优化的二次规划模型

2.1 增量二次规划的数学模型

系统有功功率平衡关系为

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} - P_{\text{loss}} = 0 \tag{4}$$

式中： P_{Gi} 为*i*节点发电机的有功出力； P_{Li} 为*i*节点负荷的有功功率； P_{loss} 为全网络的有功损耗。

设控制变量为发电机机端电压*U*、变压器分接头*K*和无功补偿容量*Q*，则网络有功损耗可表达为这些控制变量的非线性函数 $f(U, Q, K)$ ，在稳定运行状态下，功率平衡关系式可表示为

$$\phi(U_0, Q_0, K_0) = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{Li} - f(U_0, Q_0, K_0) = 0 \tag{5}$$

在控制变量为正增量下的功率平衡方程为

$$\phi(U_0 + \Delta U, Q_0 + \Delta Q, K_0 + \Delta K) = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{Li} - f(U_0 + \Delta U, Q_0 + \Delta Q, K_0 + \Delta K) = 0 \tag{6}$$

对式(6)进行泰勒级数展开，只保留一次项，可得

$$\phi(U_0 + \Delta U, Q_0 + \Delta Q, K_0 + \Delta K) = \phi(U_0, Q_0, K_0) + \frac{\partial \phi}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial \phi}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial \phi}{\partial K} \Delta K = 0 \tag{7}$$

在式(7)中， $\phi(U_0, Q_0, K_0) = 0$ ，即

$$\frac{\partial \phi}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial \phi}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial \phi}{\partial K} \Delta K = 0 \tag{8}$$

记

$$J_U = \frac{\partial \phi}{\partial U}, \quad J_Q = \frac{\partial \phi}{\partial Q}, \quad J_K = \frac{\partial \phi}{\partial K}$$

则

$$J_U \Delta U + J_Q \Delta Q + J_K \Delta K = 0$$
$$\Delta U = -J_U^{-1} J_Q \Delta Q - J_U^{-1} J_K \Delta K$$

所以电压约束条件可表示为

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \tag{9}$$

2.2 变压器约束条件的处理

为防止可调压变压器分接头在调整时出现滑档波动，规定其变化时，只能向附近一档调整，即 $-k \leq \Delta K \leq +k$ ，其中*k*为可调压变压器分接头调节一档的变化量。

电容器的投切可表示为

$$-Q_c \leq \Delta Q \leq +Q_c \tag{10}$$

式中： Q_c 为电容器单组容量，即电容器的每次投切是以一组为单位的全投或者全切。

经过上述推导转换，就可以得到以控制变量增量表达的二次规划的电力系统动态无功优化数学模型。它的目标函数为二次函数，约束条件为线性函数。由海森矩阵可以证明它具有半正定性，因此可以

用求解线性互补问题的 Lemke 算法^[7]在有限次内求得最优解。

2.3 控制变量的启发式归并方法

由上面优化求解得出的结果虽然是在满足电压要求的条件下有功损耗最小，但很有可能得出的结果不满足一天内电容器投切次数和变压器分接头调节次数限制的要求，本文采用启发式归并方法加以调整，使其满足要求。

(1)在电力系统实际运行过程中，为了减少由于无功功率流过线路和变压器引起的有功损耗，除了在特殊情况下，如负荷的无功部分小于电容器的容量，以致出现过补偿，或者在轻负荷下，因电压过高而需要切除部分电容器之外，在变电站中往往尽可能将电容器组全部投入来补偿负荷的功率因数。因此，如果要减少电容器的总投切次数，应该首先考虑将计算结果中电容器连续切除状态下持续时间最短的那一段，由切除改为投入，从而减少总投切次数。

如图 1 所示，若在计算结果中，电容器处于切除状态的 3 个时间区域，它们的持续时间分别是 1、2、3 h，则考虑将持续时间为 1 h 的电容器由切除改为投入。当电容器投切次数还不满足要求时，如图 2 所示，其切除顺序分别为 t_1 、 t_5 、 t_3 时刻的投切操作，以此类推。

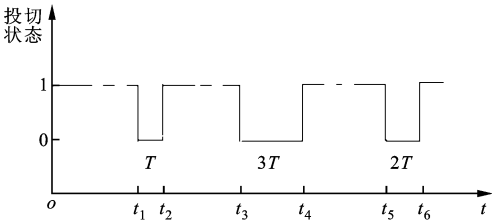


图 1 电容器投切前状态示意图

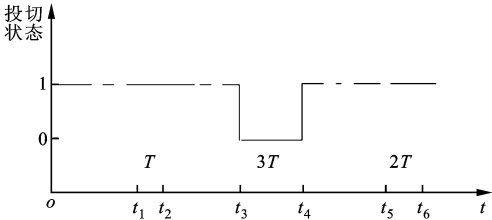


图 2 电容器投切后状态示意图

(2)在实际运行中，通常在负荷较重的时刻电压偏低，而在负荷较轻的时刻电压偏高。利用改变带负荷可调压变压器的分接头档位来保证电压在容许范围内，在负荷较重时将分接头调向较低档位，在负荷较轻时上调。因此，与上述电容器组投切原理相同，在计算结果中将可调压变压器的分接头最低(或最

高)档位持续时间最短的分接头位置加以调整,直到满足约束条件为止.当变压器分接头处于不同档位且切换次数不满足限制要求时,其排除顺序为 t_2 、 t_5 、 t_1 ,如图 3 所示,此时进行切换操作,如图 4 所示,以此类推,从而减少总的动作次数.

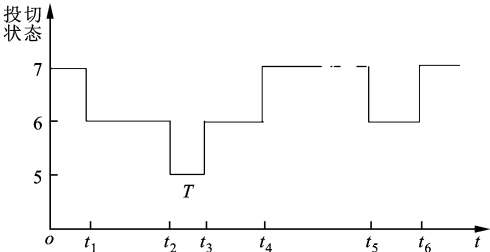


图 3 变压器切换前状态示意图

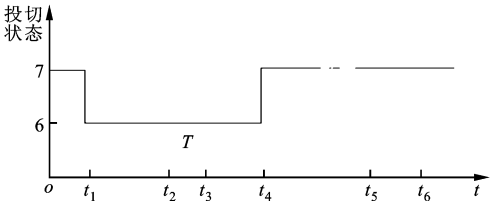


图 4 变压器切换后状态示意图

通过 Lemke 算法求得上述增量二次规划问题的连续解,即为不考虑一天内电容器组投切次数和可调压变压器分接头档位变化次数限制的连续解,计算结果按四舍五入的原则对在计算中连续化处理的离散变量再进行离散化.检验离散值控制变量日允许动作次数约束限制,若满足要求则得到最终结果,若不满足则按启发式归并算法对其进行约束限制,再返回求解新的增量二次规划问题的连续解,其计算流程如图 5 所示.

3 算例分析

以 IEEE30 节点系统作为测试算例,其拓扑结构如图 6 所示.系统有 30 个节点,6 个发电机节点,21 个负荷节点,37 条线路,4 条变压器支路,以及 2 个并联电容无功补偿点.在 6 个发电机节点中,1 号发电机作为平衡节点,6-9、6-10、4-12、27-28 分别是 4 台有载调压变压器支路,各变压器均有 17 个档位可调节,变压器一天中档位变化的限制次数为 5 次.并联电容器补偿点节点号为 10 和 24,其中 10 号补偿点有 5 组电容器,单组容量为 0.038(标么值),24 号补偿点有 2 组电容器,单组容量为 0.02(标么值),各台电容器一天投切的次数限制为 2 次.各节点电压幅值的约束范围为 0.97~1.03(标么值).设初始状态为:全部电容器均不投入,可调压变压器分

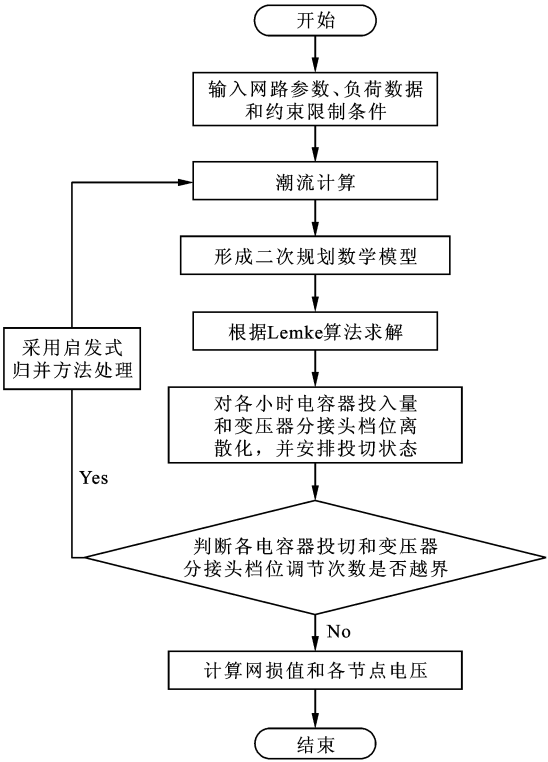


图 5 动态无功优化二次规划的计算流程

接头在其额定档位.以本文方法实现动态无功优化控制,各变压器分接头调节和电容器组投切次数都在要求范围内的优化结果如表 1 所示.

由表 1 可以看出,采用本文方法进行优化后,不仅电压全部满足要求,而且全网损耗也有明显下降,比优化前下降约 6%.

表 1 IEEE30 节点系统优化前后结果比较

状态	电能损耗(标么值)	电压合格率/%
优化前	0.905	87.08
优化后	0.854	100

为进一步说明本文方法的动态调节特性,以包

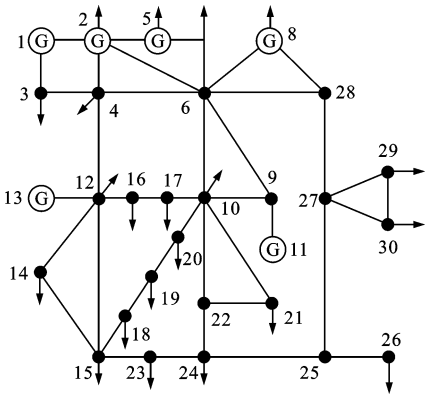


图 6 IEEE30 节点系统结构图

括 6-10 变压器和补偿电容器同时存在的 10 号负荷节点进行分析,10 号负荷节点在分析日的负荷预测数据如图 7 所示。

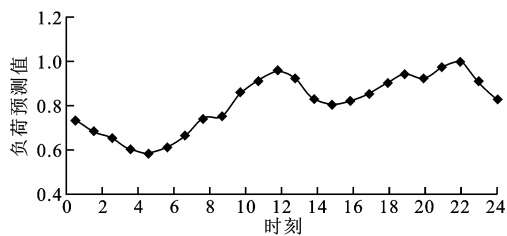


图 7 10 号负荷节点一天内的负荷曲线

以本文方法得到可调压变压器分接头在该日的动作次数为 5,电容器投切次数为 2,在各时段的调节分布如表 2 和表 3 所示。

由图 7 和表 2、表 3 比较分析可知,该计算日的负荷在 5 时左右为谷段,中午 12 时左右和晚上 10 时左右为两峰时段。通常在负荷谷时段,母线电压偏高,需要首先考虑上调变压器分接头一档,若不满足电压要求,再切除补偿电容器一组。在负荷峰时段,电压通常偏低,首先考虑先投入补偿电容器一组,若电压仍不满足要求,再考虑下调变压器分接头一档。显然,本文方法在保证电压运行要求和降低运行网损的前提下能有效调节负荷变化引起的电压波动。

表 2 6-10 变压器分接头调节状态

时段	0~3	3~6	6~9	9~14	14~18	19~24
档位	8	9	8	9	8	9

表 3 10 号节点电容器投切状态

时段	0~3	3~9	9~24
投入组数	5	4	5

采用罚函数法与本文方法的控制变量约束优化结果与计算时间比较见表 4。由表 4 可以看出,从网损方面来看,两者相差不大,从计算时间方面来看,本文方法计算速度更快,这说明本文采用启发式归并算法处理控制变量在一天中的动作次数约束是可行和有效的。

以本文方法、改进遗传算法及内点法对算例进

表 4 IEEE30 节点系统优化结果比较

算法	电能损耗(标么值)	电压合格率/%	计算时间/s
罚函数法	0.849	100	3.753
本文方法	0.854	100	2.457

行了优化计算,结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,本文方法在 100%满足电压合格率前提下,在降低电能损耗方面不是最优,但是对实现实时动态无功控制的快速收敛要求方面具有明显优势。

表 5 IEEE30 节点系统不同方法优化结果比较

算法	电能损耗(标么值)	电压合格率/%	计算时间/s
优化前	0.905	87	
改进遗传算法	0.845	100	1 101
内点法	0.857	100	25
本文方法	0.854	100	2.457

4 结 论

针对电力系统动态无功优化控制问题,考虑了电容器投切和可调压变压器分接头档位改变日允许次数限制的实际问题,提出了一种二次规划的计算方法。

(1)数学模型中目标函数具有海森矩阵的半正定性,使用解线性互补问题的 Lemke 算法保证在有限步内求得问题的最优解。因此,动态无功优化控制计算量小,非常适合于对计算速度和算法稳定性要求高的动态无功优化控制问题。

(2)采用启发式归并算法对控制设备的日允许操作次数进行约束限制,有效避免了将控制变量动作次数约束纳入优化过程的复杂性,而且处理结果满足工程实际。

参考文献:

- [1] 任晓娟,邓佑满,赵长城. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(1): 31-36.
REN Xiaojuan, DENG Youman, ZHAO Changcheng. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(1):31-36.
- [2] 刘明波,朱春明,钱康龄. 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(3):34-40.
LIU Mingbo, ZHU Chunming, QIAN Kangling. Dynamic reactive-power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(3):34-40.
- [3] 于钊,赵登福,夏经德,等. 电力系统动态无功/电压优化控制的一种新算法[J]. 西安交通大学学报,2006, 40(12):1441-1445.

- YU Zhao, ZHAO Dengfu, XIA Jingde, et al. New algorithm for dynamic optimal reactive power and voltage control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(12): 1441-1445.
- [4] 张勇军, 俞悦, 任震. 实时环境下动态无功优化建模研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 12-15.
- ZHANG Yongjun, YU Yue, REN Zhen. Research on dynamic modeling for reactive power optimization under real-time circumstance[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 12-15.
- [5] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 45-49.
- HU Zechun, WANG Xifan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 45-49.
- [6] 赖永生, 刘明波. 电力系统动态无功优化问题的快速解耦算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 32-38.
- LAI Yongsheng, LIU Mingbo. Fast decomposition algorithm for solution of dynamic reactive power optimization problem in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 32-38.
- [7] 杨冰. 实用最优化方法及计算机程序[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1994: 61-79.
- (编辑 杜秀杰)

[优秀博士论文摘登]

环氧复合材料快脉冲真空闪络特性研究

作者: 陈玉; 导师: 成永红

单位: 西安交通大学电气工程学院

在高功率脉冲技术领域, 由于固体绝缘材料的沿面闪络电压远远低于同等绝缘距离的体击穿电压, 脉冲功率装置的真空绝缘支撑部件由于沿面闪络引起的绝缘破坏最为常见, 因此成为限制脉冲功率传输的一个重要难点. 随着脉冲功率装置向更高功率、更高容量、更小型化方向的发展, 对真空绝缘材料的沿面闪络特性提出了更高的要求. 针对脉冲功率装置中真空绝缘支撑材料介电性能提高这一重要需求背景, 本文从环氧复合材料的介电性能、尺寸影响、外施电场等微观、介观、宏观效应研究入手, 以电荷的产生、输运、分布为主线, 着重研究了环氧复合材料真空闪络规律和闪络机理, 建立了可以更好表征环氧复合材料真空闪络特性的“深浅陷阱模型”和“多层结构深浅陷阱模型”, 提出了基于场致电子发射效应的不同陡度下的闪络电压关系方程. 主要成果如下.

(1) 从 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 Al_2O_3 、 BaTiO_3 、 TiO_2 等不同填料的环氧复合材料介电性能的角度研究了真空快脉冲闪络机理, 通过对不同电极材料的电子发射特性、填料对复合材料体系电荷注入影响以及填料介电性能对三结合点电场强度影响的研究, 认识环氧复合材料在快脉冲作用下电荷产生的基本规律; 通过对不同填料的环氧复合材料的二次电子发射系数、热刺激电流的研究, 认识电荷输运的基本特性与快脉冲作用下的闪络特性之间的关系; 通过对不同介电性能填料对闪络前后电荷分布规律影响的研究, 分析表面电荷分布与环氧复合材料真空快脉冲闪络电压之间的关系, 从电荷产生、输运、分布的角度, 认识了环氧复合材料介电性能的对快脉冲作用下真空闪络特性的影响规律, 进而提出了一种环氧复合材料真空快脉冲闪络的深浅陷阱模型, 该模型给出了闪络起始、闪络发展、闪络贯穿等不同阶段复合体系中电荷的深陷阱和浅陷阱对闪络过程电荷产生、输运的作用, 及对闪络的影响作用规律.

(2) 针对不同粒径微米复合材料及微纳米复合材料表现出来的不同闪络特性, 本文从复合材料体系中填料介观尺寸影响的角度研究了其对环氧复合材料闪络特性的影响机制. 首先分析了填料的介观界面结构的基本特征, 以及偶联剂对界面的修饰作用, 及其对闪络电压的影响规律; 建立了复合材料体系中填料的空分布的简立方计算模型, 计算了环氧复合材料体系中微米或纳米粒子的界面体积分数、比表面积等粒子分布参数, 发现了复合材料体系中的填料粒子尺度、填料体积分数等对界面结构、界面分布、界面体积分数的影响规律, 以及填料粒子的尺寸影响对其界面表现出不同的陷阱能级分布的影响规律, 结合填料粒子在添加到一定比例时发生的逾渗现象, 发现了填料粒子的尺寸影响与环氧复合材料闪络电压的内在联系. 在此基础上, 建立了 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 复合材料深浅陷阱分布随填料比例变化的模型, 在上一章深浅陷阱模型的基础上, 进一步考虑了填料粒子的尺寸影响及其对电荷产生、输运、分布的影响, 能够更好地解释环氧复合材料闪络特性曲线的变化规律.

(3) 针对试验中发现的不同快脉冲上升沿的陡度对闪络电压的影响, 发现一般意义上的数学方程因难以清晰表达闪络的物理本质过程, 本文从电荷产生与输运的角度入手, 研究电子发射过程在闪络过程中的作用, 讨论进行闪络时延、闪络电压、脉冲陡度之间的关系, 建立了一种基于肖特基效应和场致发射效应的脉冲陡度与闪络电压关系的拟合公式, 可以从闪络的物理本质角度反映外施电压对电荷的驱动及对闪络发生发展过程影响.