



การออกแบบและการจำลองการทำงานแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิร์ตซ์ สำหรับกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว

ปพน สะอาดยวง

สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

อัครเดช กาบมาลา

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ชัชวาลย์ กันทะลา

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

พานิช อินต๊ะ*

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9755-1985 อีเมล: panich_intra@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.014

รับเมื่อ 30 กันยายน 2559 ตอรับเมื่อ 8 มิถุนายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 12 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิร์ตซ์ สำหรับระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ วงจรแหล่งกำเนิดที่ออกแบบประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 เฟส 20KVA 22 kV ตัวเก็บประจุพิกัด 1 μ F อุปกรณ์สวิตช์ Spark Gap และวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ 3 เฟส ในการศึกษาได้ทำการจำลองการทำงานวงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB จากผลการคำนวณพบว่า วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ที่ออกแบบสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{peak}) เท่ากับ 35.5 kV ที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 6 μ s ที่ความถี่ Repetitive Pulses ในช่วง 1, 3 และ 5 Hz ซึ่งจากการออกแบบระบบนี้สามารถนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อในอาหารเหลวและพัฒนาให้อยู่ในระดับของภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไป

คำสำคัญ: แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง, สนามไฟฟ้าแบบพัลส์, การพาสเจอร์ไรส์, เชื้อจุลินทรีย์, อาหารเหลว

การอ้างอิงบทความ: ปพน สะอาดยวง อัครเดช กาบมาลา ชัชวาลย์ กันทะลา และ พานิช อินต๊ะ, “การออกแบบและการจำลองการทำงานแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิร์ตซ์ สำหรับกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 89-101, ม.ค.-มี.ค. 2561.

Design and Simulation of a 3 Phase 25 kV 20 kW 5 Hz Pulsed High Voltage Generator for Microorganisms Inactivation Process in a Liquid Food

Papol Sardyoung

Department of Electrical Technology Industrial, Faculty of Technology Industrial, Thepsatri Rajabhat University, Lop Buri, Thailand

Akaradej Kapmala

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

Chatchawan Kantala

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

Panich Intra*

Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding Author, Tel: 08-9755-1985, E-mail: panich_intra@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.014

Received 30 September 2016; Accepted 8 June 2017; Published online: 12 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

A 3 phase 25 kV 20 kW 5 Hz pulsed high voltage generator for a liquid food microorganisms inactivation process was designed and described in this paper. The designed generator consisted of a 3 Phase 20 kVA 22kV high voltage transformer, a high voltage capacitor of 1 μ F, a spark gap, and bridge rectifier circuit. In this study, the designed circuit was computationally calculated by the Simulink/MATLAB. It was found from the calculation results of the designed circuit that the peak pulsed high voltage (V_{peak}) was about 35.5 kV with the pulse width of about 6 μ s at repetitive pulses between 1, 3 and 5 Hz. The results in this study can be used to test inactivating microorganism efficiency of the liquid foods and further developing PEF system for food industry level.

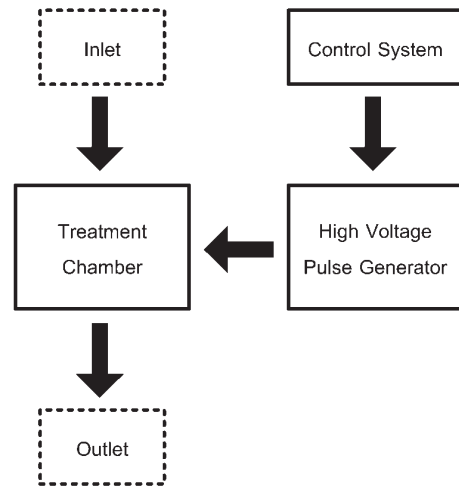
Keywords: High Voltage Power Supply, Pulsed Electric Field, Pasteurization, Microorganisms, Liquid Food

Please cite this article as: P. Sardyoung, A. Kapmala, C. Kantala, and P. Intra, "Design and simulation of a 3 phase 25 kV 20 kW 5 Hz pulsed high voltage generator for microorganisms inactivation process in a liquid food," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 89–101, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

กรรมวิธีการถนอมรักษาอาหารโดยการทำลายเอนไซม์ (Enzyme) และยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร เพื่อที่จะสามารถยืดอายุและเก็บรักษาอาหารไว้ให้นานขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยกระบวนการใช้ความร้อน (Thermal Processing) ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยความร้อนเป็นตัวกลางในการทำลายเอนไซม์ต่างๆ และเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร โดยแบ่งออกเป็นวิธีการพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) เป็นวิธีถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร และวิธีการสเตอริไลซ์ (Sterilization) เป็นวิธีการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดหรือ 100 องศาเซลเซียส ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารทั้งหมด [1] ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันและสเตอริไลซ์ ได้แก่ น้ำผลไม้ นม อาหารกระป๋อง เป็นต้น

แต่จากการศึกษาพบว่า การถนอมรักษาอาหารโดยกระบวนการใช้ความร้อนนั้น มีกระบวนการทำงานที่ยุงยาก ซับซ้อน มีการใช้พลังงานและต้นทุนในระบบที่ค่อนข้างสูงจากการให้กำเนิดความร้อน นอกจากนี้กรรมวิธีการใช้ความร้อนนั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารเหลว เช่น รสชาติ กลิ่น สี และความสด ซึ่งจะทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารนั้นลดลง [1], [2] ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและออกแบบเทคโนโลยีการใช้พลังงานต่ำในการถนอมรักษาอาหารแบบกระบวนการไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal Processing) โดยวิธีสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulsed Electric Field; PEF) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เวลาในการทำงานของระบบในช่วงเวลาสั้นๆ ระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน และงบประมาณที่ใช้ในการลงทุนไม่สูงมาก นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณค่าทางโภชนาการของอาหารน้อยมาก [3]-[13] โดยทั่วไปส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ (High Voltage Pulse Generator) ระบบควบคุม (Control System) และ

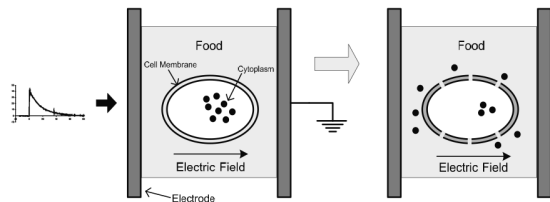


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบ PEF ทั่วไป

ห้องฆ่าเชื้อ (Treatment Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงพัลส์ให้กับห้องฆ่าเชื้อเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงพัลส์ (High Pulsed Electric Field Strength) สำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ในระบบสนามไฟฟ้าพัลส์มีส่วนประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน เมื่อเทียบกับระบบพาสเจอร์ไรซ์ส่วนแรกคือแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงซึ่งเป็นส่วนที่จะแปลงกระแสสลับจากสัญญาณไฟฟ้าทั่วไปเป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูง ส่วนที่ 2 ของระบบคือ โมดูเลเตอร์พัลส์ (Pulse Modulator) ซึ่งจะแปลงจากไฟกระแสตรงไปเป็นไฟแบบพัลส์ที่มีแรงดันยอดสูง ส่วนสุดท้ายคือห้องฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นที่ที่อาหารเหลวจะได้รับแรงดันสูงแบบพัลส์ [14] แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะแปลงไฟกระแสสลับที่ได้มาเป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูง แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงโดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นกำลังเฉลี่ยคือวัตต์ โครงสร้างระบบของแหล่งจ่ายไฟแบ่งออกเป็นหลักๆ 3 ประเภท ระบบแรกที่ย่างที่สุดคือระบบที่ใช้หม้อแปลงเรียงกระแสไฟ (Transformer Rectifier) ซึ่งทำงานที่ความถี่ 50-60 เฮิรตซ์ ระบบแหล่งจ่ายแบบนี้เป็นระบบที่ถูกที่สุดแต่มีขนาดใหญ่ในเครื่องที่ให้กำลังไฟสูง ซึ่งเป็นข้อเสียในแง่ของการควบคุมแรงดัน การรักษาระดับแรงดันและผลต่อระบบกำลังไฟโดยรวม แต่อย่างไรก็ตามระบบแบบนี้เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่าย

น้อยที่สุด ระบบแบบที่ 2 เป็นระบบจ่ายไฟที่ใช้ระบบสวิตซิง (Switching Power Supply) ในการออกแบบระบบนี้กำลังไฟขาเข้าจะถูกเรียงและตัดที่ความถี่สูง (ประมาณ 10–50 กิโลเฮิร์ตซ์) ก่อนเข้าไปที่หม้อแปลงเรียงกระแสไฟ ขนาดของหม้อแปลงที่ใช้จะมีขนาดลดลงตามความถี่ในการตัดคลื่นที่สูงขึ้น ทำให้ขนาดของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงกำลังสูงที่มีขนาดไม่ใหญ่ ระบบสวิตซิงจะให้แรงดันที่รักษาระดับการควบคุมได้ดี และสามารถตั้งค่าแรงดันขาออกได้ ทำให้เหมาะสมในการควบคุมตัวแปรในกระบวนการ PEF ซึ่งเป็นอิสระกับส่วนของโมดูลเตอร์ ระบบแหล่งจ่ายแบบสวิตซิงโดยทั่วไปจะใช้กำลังมากถึง 500 กิโลวัตต์ ซึ่งสนับสนุนการทำงานของระบบ PEF ที่มีอัตราการไหลได้มากถึง 10,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมากพอต่อการผลิตภาคอุตสาหกรรม ข้อเสียของระบบแหล่งจ่ายแบบสวิตซิงนี้คือราคาที่สูง ซึ่งสูงกว่าแบบแรกประมาณ 2–5 เท่าที่กำลังเท่ากัน ในระดับแรงดันที่สูงมากๆ (500 กิโลวัตต์ขึ้นไป) รูปแบบที่เหมาะสมจะเป็นการผสมผสานของหม้อแปลงเรียงกระแสไฟ (สำหรับกำลังที่ไม่มีการรักษาระดับ) และตัวรักษาระดับแรงดันความถี่สูง เช่น ตัวลดทอนแรงดัน Buck Regulator ที่ฝังขาออกเพื่อควบคุมระดับแรงดันสุดท้าย ในระบบแหล่งจ่ายไฟแบบนี้ เป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในกระบวนการ PEF ที่ต้องการกำลังสูงๆ เช่น ในสายการผลิตอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ หรือการบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ [14] สำหรับโมดูลเตอร์จะออกแบบให้ถูกควบคุมโดยการลัดวงจรโดยอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ลัดวงจรผ่านช่องว่าง (Spark Gap) ที่ชื่อไทรatron (Thyratron) หรืออุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบโซลิดสเตต (Solid State) เช่น ตัวเรียงกระแสไฟแบบซิลิคอนคอนโทรล (Silicon Controlled Rectifier) [15]–[18]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ดังกล่าวไปสู่เชิงพาณิชย์ในต่างประเทศ จึงทำให้มีราคาสูงหลายล้านบาทและจำเป็นต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อใช้กับงานวิจัยเกี่ยวกับการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหารเหลวในประเทศ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาออกแบบระบบและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์โดยใช้เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายใน



รูปที่ 2 กระบวนการอิเล็กโทรโพเรชันในเชื้อจุลินทรีย์ [19]

ประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ จะช่วยลดการนำเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงพัลส์นี้จากต่างประเทศได้ ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการออกแบบและจำลองการทำงานแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์สำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ จะช่วยลดการนำเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงพัลส์นี้จากต่างประเทศได้ และสามารถนำระบบไปพัฒนาให้อยู่ในระดับของภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไป

2. หลักการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์

หลักการทำงานพื้นฐานของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ คือ การใช้วิธีการทางไฟฟ้าในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) ของเชื้อจุลินทรีย์ที่เรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรโพเรชัน (Electroporation) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการเพิ่มค่าสภาพความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permeability) ที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งสามารถทำได้โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงแบบพัลส์ให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ภายในห้องฆ่าเชื้อ ทำให้บริเวณภายในห้องฆ่าเชื้อหรือ Treatment Zone เกิดสนามไฟฟ้าที่มีปริมาณความเข้มสูงมาก จนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่บริเวณผิวของเยื่อหุ้มเซลล์จะมีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนเล็กๆ (Pores) เป็นจำนวนมาก และเกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกกับของเหลวภายในเซลล์หรือไซโทพลาซึม

(Cytoplasm) จนทำให้รูพรุนของเยื่อหุ้มเซลล์นั้นมีขนาดใหญ่ จนเซลล์ไม่สามารถซ่อมแซมหรือคืนสภาพตัวเองได้ เซลล์ จะเกิดการแตกตัวและไม่สามารถเจริญเติบโตได้อีก [5] ดังนั้นในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยวิธีการใช้สนามไฟฟ้า แบบพัลส์นั้น จำเป็นจะต้องใช้ค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ จำนวนพัลส์ และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีความเหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซ่อมแซมเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้

3. หลักการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์

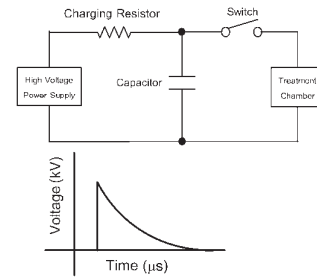
วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าสูงที่มีลักษณะเป็นแบบพัลส์เพื่อจ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ ภายในวงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (High Voltage Power Supply) ตัวต้านทานไฟฟ้าที่ควบคุมการอัดประจุไฟฟ้า (Charging Resistor) คาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน (Energy Storage Capacitor) และอุปกรณ์ควบคุมที่มีความไวในการสวิตชิงสูง เช่น Spark Gap, Thyatron หรือ Ignitron เป็นต้น [15]–[18]

โดยหลักการทำงานของวงจรคือจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงผ่านตัวต้านทานให้คาปาซิเตอร์เพื่ออัดประจุสะสมพลังงานและเมื่ออุปกรณ์สวิตชิงทำงานจะทำให้คาปาซิเตอร์คายประจุพลังงานให้กับวงจรตามลักษณะการทำงานพื้นฐานของวงจรอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่อัดและคายประจุได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [19]

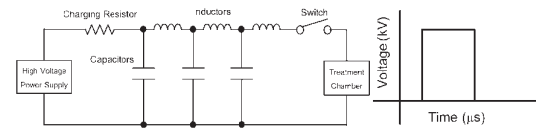
$$V_{c1} = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

$$V_{c2} = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

เมื่อ V_{c1} คือ แรงดันไฟฟ้าจากการอัดประจุ V_{c2} คือ แรงดันไฟฟ้าจากการคายประจุ V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต t คือ เวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ R คือ ตัวต้านทาน Charging Resistor และ C คือ ตัวคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์แบบ

(ก) Exponential Pulse และ (ข) Square Pulse

วงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ที่มีลักษณะรูปคลื่นเป็นแบบ Exponential Pulse และแบบ Square Pulse ดังแสดงในรูปที่ 3 ความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width) ที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ความกว้างของสัญญาณพัลส์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีค่ามากกว่าช่วงเวลาวิกฤตหรือช่วงเวลาทีเซลล์ได้รับสนามไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลง (Membrane Relaxation Time) ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 10 ns [20] จึงจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ เกิดการถ่ายเทศักย์ไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้จาก

$$\tau = CR_{load} \quad (3)$$

เมื่อ τ คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ C คือ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน และ R คือ ค่าความต้านทานของอาหารซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$R = \frac{d}{\sigma A} \quad (4)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ σ คือ ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของอาหาร และ A คือ พื้นที่ภายในทั้งหมดของห้องฆ่าเชื้อ

ความกว้างของสัญญาณพัลส์จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบ Exponential Pulse จะอยู่ที่ 37 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ความกว้างของรูปคลื่นแบบ Square Pulse มีค่ามากกว่ารูปคลื่นแบบ Exponential Pulse

พลังงานในกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารโดยวิธี PEF นั้น จะใช้พลังงานของระบบไม่สูงมากเนื่องจากเป็นกรรมวิธีไม่ใช้ความร้อนจึงไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อน จากงานวิจัยพบว่าในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* จำนวน $\log 4$ ด้วยสนามไฟฟ้าขนาด 25 kV/cm สูญเสียพลังงานทั้งหมด 297 kJ/L [19] ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปของระบบคือพลังงานที่ใช้สร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบพัลส์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยสามารถหาพลังงานจากการสร้างสัญญาณแบบ Exponential Pulse ได้จาก [20]

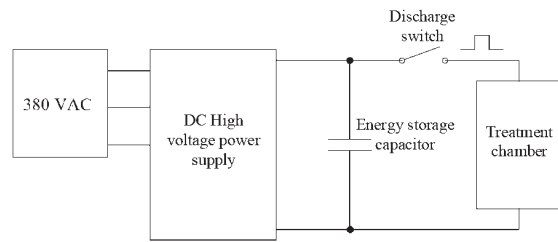
$$Q = \frac{V_0^2 Cn}{2v} = \frac{V_0^2 t}{2Rv} \quad (5)$$

เมื่อ Q คือ ความหนาแน่นของพลังงาน V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าจากการชาร์จประจุ C คือ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน R คือ ค่าความต้านทานของอาหาร t คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ n คือ จำนวนพัลส์ทั้งหมด และ v คือ ปริมาตรภายในห้องฆ่าเชื้อ

สำหรับรูปคลื่นสัญญาณแบบ Square Pulse สามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นได้จาก

$$Q = \frac{VI\tau n}{v} = \frac{V^2 t}{Rv} \quad (6)$$

เมื่อ V คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าภายในระบบ I คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าของระบบ และ τ คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์



รูปที่ 4 โดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์

4. การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์

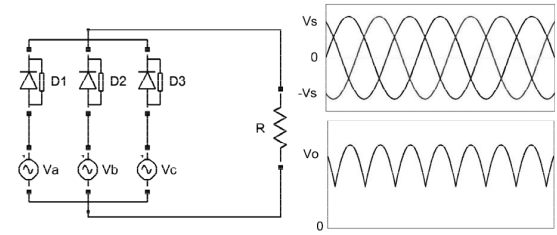
ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อจะต้องมากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (Critical Electric Field Strength) ของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือค่าสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกกับของเหลวภายในเชื้อจุลินทรีย์นั้น จะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะรูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์โดยจะอยู่ที่ประมาณ 3.8–14 kV/cm [19], [20] และปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารจะอยู่ที่ 20–80 kV/cm [20]

ส่วนประกอบพื้นฐานของการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ 3 เฟสนี้จะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Three Phase Power Supply) วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (DC High Voltage Power Supply) หรือวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ตัวเก็บประจุกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Chamber) สวิตซ์ดีสชาร์จ (Discharge Switch) และห้องฆ่าเชื้อ ดังแสดงไว้รูปที่ 4

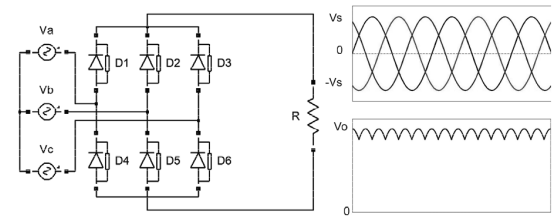
วงจรเรียงกระแส 3 เฟส (Three Phase Rectifier) มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวคือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียว โดยในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันแต่มีมุมเฟสที่ต่างกัน ดังนั้นวงจรเรียงกระแส 3 เฟส จึงทำหน้าที่รวมรูปคลื่นจากการเรียงกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3 เฟส เข้าด้วยกันทางด้านเอาต์พุตของวงจร โดยทั่วไปสามารถแบ่งวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

3 เฟส (Three Phase Half Wave Rectifier) และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Three Phase Full Wave Rectifier) นอกจากนี้ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นยังสามารถแบ่งออกได้เป็น วงจรเรียงกระแสแบบเซ็นเตอร์แทป (Full Wave Center Tapped) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งบริดจ์ (Half-bridge Rectifier) และวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) เป็นต้น ลักษณะเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นและวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5

สำหรับการศึกษานี้ได้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งสามารถปรับค่าได้ (Three Phase Variac) 0-380/400 VAC ต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 เฟส (Three Phase High Voltage Transformer) 380 V/22 kV ขนาดความจุ 20 kVA ไดโอดแรงสูง (High Voltage Diode) พิกัด 40 kV/1 A จำนวน 6 ตัว ตัวต้านทานแรงสูง (Charging Resistor) 25 k Ω อุปกรณ์ควบคุมการสวิตชิง Spark Gap สำหรับควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จประจุ ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถทนกระแสไฟฟ้าจากการสปาร์กได้หลายกิโลแอมป์ (kA) ตัวเก็บประจุแบบ High Voltage Pulse Paper in Oil PIO Capacitor ขนาดความจุ 1 μ F ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า



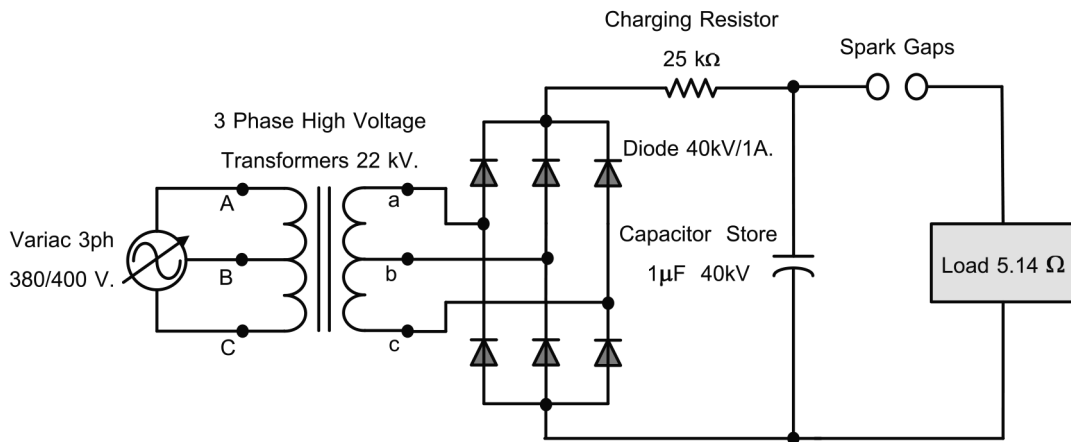
(ก)



(ข)

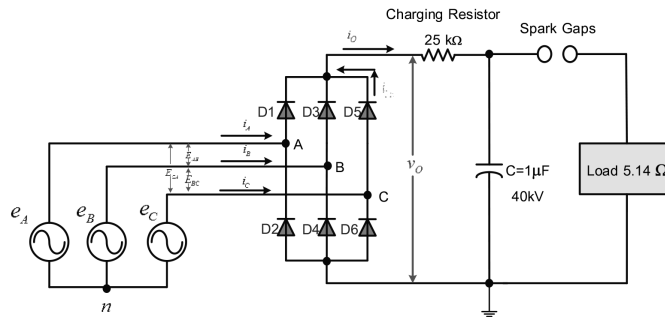
รูปที่ 5 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส (ก) แบบ Half Wave และ (ข) แบบ Full Wave

40 kV ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุสำหรับการสร้างพัลส์แรงดันสูงที่มีการสวิตช์เปิดและปิดอย่างต่อเนื่อง เพราะว่ามีการใช้กำลังโอห์มมิกค่อนข้างสูง (High Ohmic Power Consumption) โดยค่าความต้านทานของอาหารเหลวที่อยู่ภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 5.14 โอห์ม สำหรับวงจรการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ 3 เฟส ในการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์

ปพน สะอาดวง และคณะ, “การออกแบบและการจำลองการทำงานแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิร์ตซ์ สำหรับกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว.”



รูปที่ 7 วงจรแสดงแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส และกระแสไหลในแต่ละเฟส

จากรูปที่ 7 แสดงแหล่งจ่ายแรงดันของหม้อแปลง 3 เฟส พิกัด 20 kVA, 22 kV ที่ออกจากขดลวดด้านทุติยภูมิโดยการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์ (Y-connection) แรงดันระหว่างสาย (E_{AB}, E_{BC}, E_{CA}) จะสูงกว่าแรงดันที่เฟสหรือแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดด้านทุติยภูมิ (e_A, e_B, e_C) หม้อแปลง 3 เฟสเป็น $\sqrt{3}$ เท่า หรือ $V_{L-L} = \sqrt{3}V_{phase}$ มาเข้าวงจรเรียงกระแสฟูลบริดจ์เรกติไฟเออร์ 3 เฟส โดยกำหนดให้แรงดันอ้างอิงในระบบ abc แสดงตามสมการที่ (7) ถึง (9)

$$e_A = \dot{E}_A \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$e_B = \dot{E}_B \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (8)$$

$$e_C = \dot{E}_C \sin(\omega t + 240^\circ) \quad (9)$$

โดยค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลในแต่ละเฟสที่ไหลออกจากขดลวดด้านทุติยภูมิ (i_A, i_B, i_C)_{rms} สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (10)

$$(i_A, i_B, i_C)_{rms} \cong \sqrt{\left[\frac{8}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cdot \cos^2(\omega t) \cdot d(\omega t) \right]} \quad (10)$$

เมื่อ I_m คือ ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ และสามารถหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัวดังสมการที่ (11)

$$i_{D_{av}} = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (11)$$

การคำนวณค่าแรงดันเฉลี่ยด้านเอาต์พุต v_o หาได้จากสมการที่ (12)

$$V_{dc} = \frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (12)$$

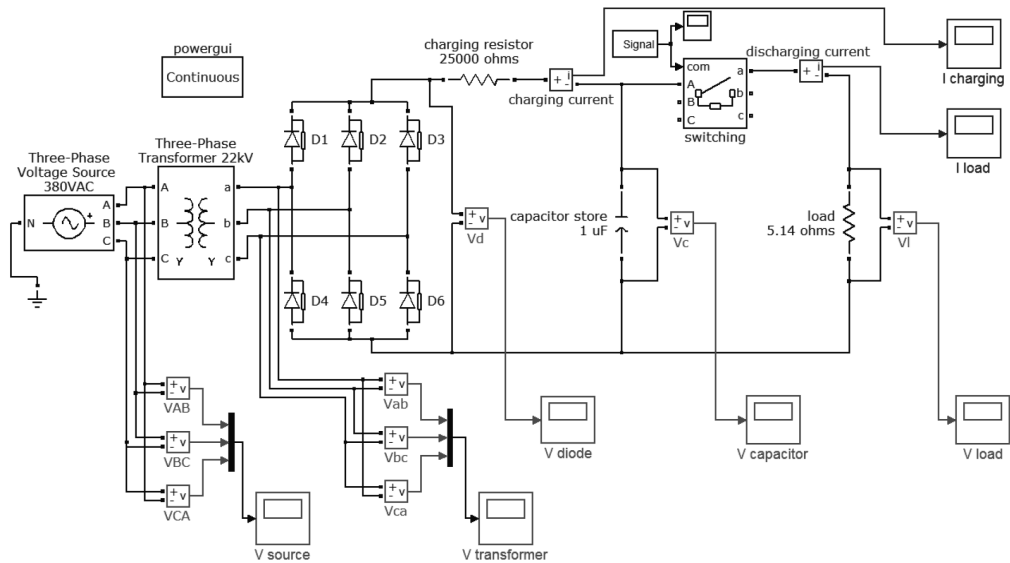
เมื่อ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันที่เฟส และสามารถคำนวณหาค่าของแรงดันอาร์เอ็มเอสที่เฟสได้จากสมการที่ (13)

$$V_{rms} = \sqrt{\left[\frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m^2 \cos^2(\omega t) \cdot d(\omega t) \right]} \quad (13)$$

จากตารางที่ 1 แสดงสถานะการทำงานของไดโอดขณะไบอัสตรงหรือการนำกระแสเป็นคู่ โดยการทำงานในสถานะเริ่มต้นที่มุมเฟส $0 < \omega t < 60^\circ$ ไดโอด D1 และ D6 จะเริ่มทำงานก่อน

ตารางที่ 1 สถานการณ์ทำงานของไดโอด วงจรเรียงกระแสฟูลบริดจ์เรกติไฟเออร์ 3 เฟส

โหมดการทำงาน ของไดโอดกำลัง	D1(ωt)	D2(ωt)	D3(ωt)	D4(ωt)	D5(ωt)	D6(ωt)
$0 < \omega t < 60^\circ$	1	0	0	0	0	1
$60 < \omega t < 120^\circ$	0	0	1	0	0	1
$120 < \omega t < 180^\circ$	0	1	1	0	0	0
$180 < \omega t < 240^\circ$	0	1	0	0	1	0
$240 < \omega t < 300^\circ$	0	0	0	1	1	0
$300 < \omega t < 360^\circ$	1	0	0	1	0	0

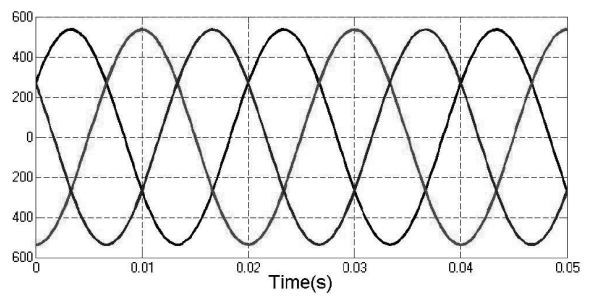


รูปที่ 8 วงจรการจำลองใน Simulink/MATLAB

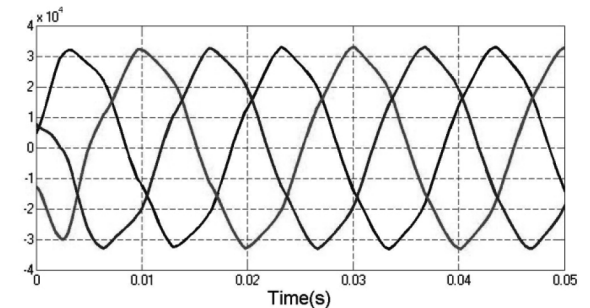
5. การจำลองการทำงานใน Simulink/MATLAB

ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงฟูลส์ 3 เฟส ในโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งวงจรจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 8 ลักษณะการทำงานของวงจรจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ออกจากรขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์ และผ่านความต้านทานแรงสูงเพื่อชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุและมีอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จประจุในการสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงฟูลส์ เพื่อจ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ในห้องฆ่าเชื้อ

จากการจำลองการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงฟูลส์ 3 เฟส พบว่าที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟส พิกัด 20 kVA, 22 kVA จะได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V_{peak}) ระหว่างเฟสทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 538 V และ 32 kV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 และขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V_{peak}) ที่ตกคร่อมวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์มีค่าเท่ากับ 36.5 kV ดังแสดงในรูปที่ 10



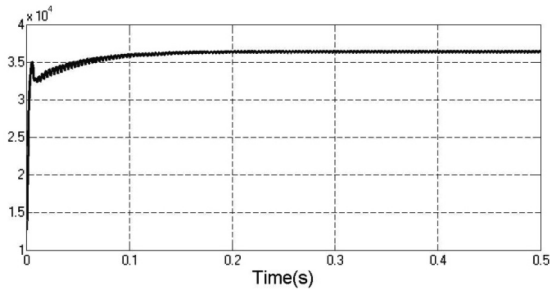
(ก)



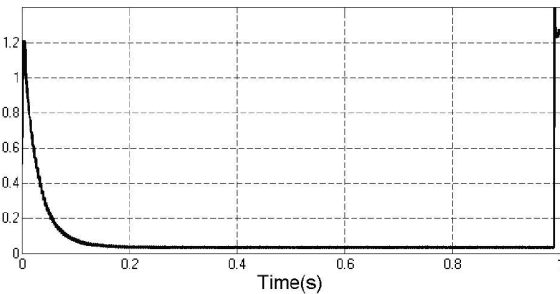
(ข)

รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส (ก) แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ และ (ข) แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

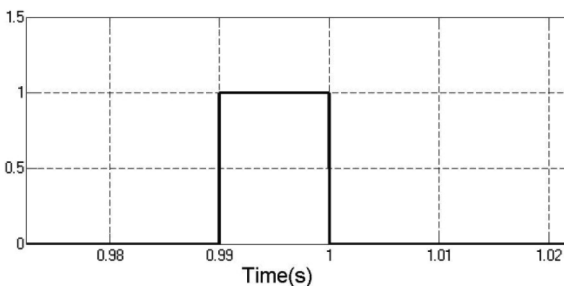
ปพน สะอาดวง และคณะ, “การออกแบบและการจำลองการทำงานแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ 3 เฟส 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิร์ตซ์ สำหรับกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว.”



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรรีจกระแสดำเนินคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์

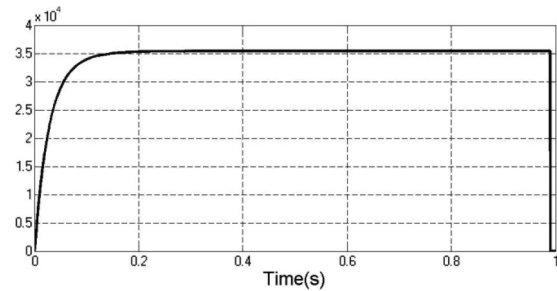


รูปที่ 11 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรรีจกระแสดำเนินคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์

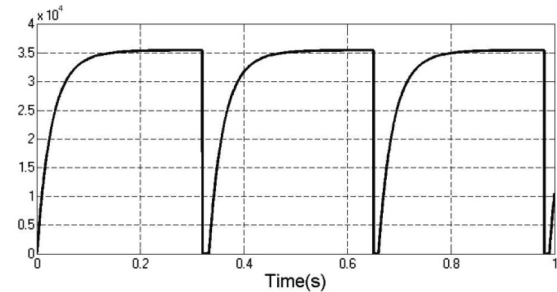


รูปที่ 12 เวลาการสวิตช์ เปิด/ปิด ที่ 0.01 s.

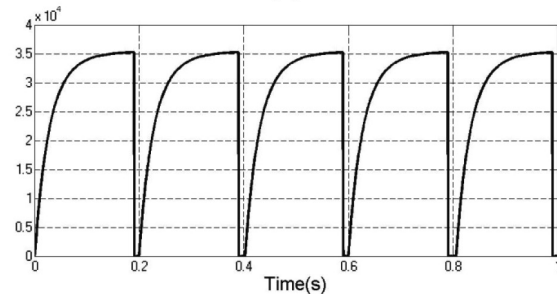
จากรูปที่ 11 แสดงรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรรีจกระแสดำเนินคลื่น 3 เฟสแบบบริดจ์ และรูปที่ 12 แสดงรูปคลื่นฟังก์ชันของเวลาในการสวิตช์ เปิด/ปิด วงจรทำงานที่เวลา 0.01 วินาที ซึ่งจากการจำลองการทำงานในการชาร์จประจุของวงจร ที่ความถี่ Repetitive Pulses 1, 3 และ 5 Hz จะได้ช่วงเวลาในการชาร์จประจุแรงดันไฟฟ้าของวงจรทั้งหมด (Capacitor Fully Charging) มีค่าเท่ากับ 0.98,



(ก)



(ข)

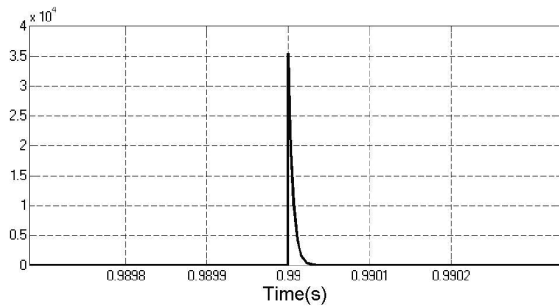


(ค)

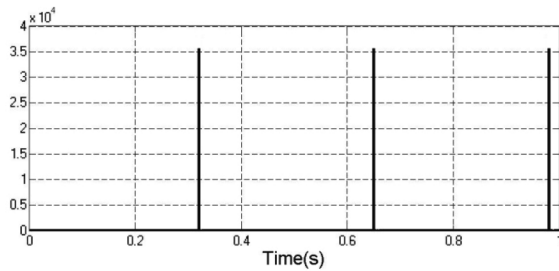
รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าขณะชาร์จประจุ (ก) Repetitive Pulses 1 Hz (ข) Repetitive Pulses 3 Hz และ (ค) Repetitive Pulses 5 Hz

0.32 และ 0.19 วินาที ตามลำดับ และขนาดของแรงดันไฟฟ้า (V_{peak}) จากการชาร์จประจุจากตัวเก็บประจุของวงจร ที่ความถี่ Repetitive Pulses 1, 3 และ 5 Hz มีค่าเท่ากับ 35.8, 35.5 และ 35.3 kV ตามลำดับ โดยจากการจำลองการทำงานพบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ผลของการจำลองการทำงานขณะชาร์จประจุไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 13

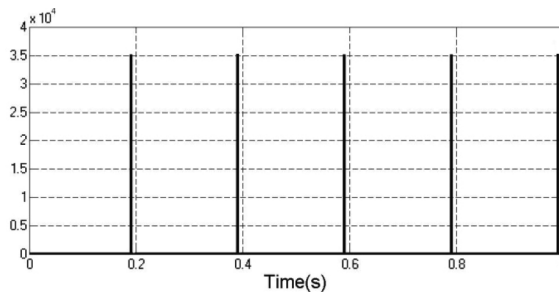
จากการจำลองการทำงานของการดิสชาร์จประจุของวงจรพบว่า ที่ความถี่ Repetitive Pulses 1, 3 และ 5 Hz



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 14 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมห้องฆ่าเชื้อ (ก) Repetitive Pulses 1 Hz (ข) Repetitive Pulses 3 Hz และ (ค) Repetitive Pulses 5 Hz

ขนาดแรงดันไฟฟ้า (V_{peak}) ขณะดิสชาร์จของตัวเก็บประจุหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมห้องฆ่าเชื้อ มีค่าเท่ากับ 35.5 kV, 35.4 kV และ 35.2 kV ตามลำดับ โดยมีลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันพัลส์เป็นแบบเอกซโพเนนเชียลดีเคย์ (Exponential Decay Pulses) ที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 6 μ s และช่วงเวลาในการดิสชาร์จประจุของตัวเก็บประจุทั้งหมด (Capacitor Fully Discharging) ประมาณ 30 μ s ผลของการจำลองการทำงานขณะดิสชาร์จประจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 14

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและจำลองการทำงานแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์สำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ 25 กิโลโวลต์ 20 กิโลวัตต์ 5 เฮิรตซ์ ด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยต้นแบบของระบบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ปรับค่าได้ 0-400 VAC หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 เฟส 22 kV 20 kVA ไดโอดแรงสูง 40 kV/1 A ตัวต้านทานแรงสูง 25 k Ω ตัวเก็บประจุพิกัด 1 μ F อุปกรณ์สวิตช์ Spark Gap และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 3 เฟส จากการออกแบบจะได้ต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{peak}) ได้เท่ากับ 35.5 kV ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 6 μ s ที่ความถี่ Repetitive Pulses 1, 3 และ 5 Hz ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งการออกแบบนี้เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้านการยับยั้งจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ในประเทศและสามารถนำระบบไปพัฒนาให้อยู่ในระดับของภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไป

ตารางที่ 2 รายละเอียดการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์

พิกัดกำลังไฟฟ้า	20 kW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส	25 kV
ค่าความต้านทานไฟฟ้าของอาหาร	5.14 Ω
ตัวเก็บประจุ	1 μ F
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{peak})	35.5 kV
ความกว้างสัญญาณพัลส์	6 μ s
ความถี่สัญญาณพัลส์	1, 3 และ 5 Hz
ราคาต้นทุน	ต่ำกว่า 50,000 บาท

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) รหัสโครงการ P-15-51038 ชื่อโครงการ “การพัฒนากระบวนการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มสำหรับอุตสาหกรรมการใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าพัลส์ระดับภาคสนาม”

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Panyamuangjai, S. Janthara, R. Kusuya, A. Yawootti, and P. Intra, “Application of pulsed electric field for milk pasteurization,” *KMUTT Research & Development Journal*, vol. 35, no. 4, pp. 469–484, 2012.
- [2] M. E. A. Mohamed and A. H. A. Eissa, “Pulsed electric fields for food processing technology,” in *Structure and Function of Food Engineering*, Ayman Amer Eissa, 2012, pp. 275–306.
- [3] T. Kangsadan, “Food preservation using High Electrical Field Pulse (HELP) technique,” *Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 1, pp. 198–207, 2011.
- [4] B.-L. Qin, G. V. Barbosa-Cánovas, B. G. Swanson, P. D. Pedrow, and R. G. Olsen, “Inactivating microorganisms using a pulsed electric field continuous treatment system,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 43–50, 1998.
- [5] B. Sen Gupta, F. Masterson, and T. R. A. Magee, “Inactivation of E. coli K12 in apple juice by high voltage pulsed electric field,” *European Food Research and Technology*, vol. 217, pp. 434–437, no. 5, 2003.
- [6] M. Walkling-Ribeiro, F. Noci, D.A. Cronin, J.G. Lyng, and D.J. Morgan, “Antimicrobial effect and shelf-life extension by combined thermal and pulsed electric field treatment of milk,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 106, no. 1, pp. 241–248, 2009.
- [7] Ayman H. El-Hag, Shesha H. Jayaram, Oscar Rodriguez Gonzalez, and M. W. Griffiths, “The influence of size and shape of microorganism on pulsed electric field inactivation,” *IEEE transactions on nanobioscience*, vol. 10, no. 3, pp. 133–138, 2011.
- [8] K. Huang and J. Wang, “Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods pasteurization process: A review,” *Journal of Food Engineering*, vol. 95, pp. 227–239, 2009.
- [9] T. Y. Tsong, “Electroporation of cell membranes,” *Biophysical Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 297–306, 1991.
- [10] P. Sen-in, P. Pinchai, O. Chaekoe1, A. Yawootti, and P. Intra, “Design of a pulsed electric field treatment chamber for a liquid foods pasteurization process,” *KMUTT Research & Development Journal*, vol. 35, no. 4, pp. 253–267, 2012.
- [11] M. Saleh Moonesan and Shesha H. Jayaram, “Effect of pulsewidth on medium temperature rise and microbial inactivation under pulsed electric field food treatment,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1767–1772, 2013.
- [12] N. Panklang, “Design of small chamber electrode for liquid food pasteurization by using pulse-electric field,” *KKU Engineering Journal*, vol.38, no. 3, pp. 255–263, 2011.
- [13] G.V. Barbosa-Cánovas and D. Sepúlveda, “Present status and the future of pef technology,” in *Novel Food Processing Technologies*, CRC Press, 2001, pp. 1–44.
- [14] M.A. Kempkes, “Case Studies in Novel Food Processing Technologies by F. Feeherry, C. J. Doona, K. Kustin” in *Pulsed electric field (PEF) systems for commercial food and juice processing*, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [15] E. J. M. van Heesch, A. J. M. Pemen, P. A. H. J.



- Huijbrechts, P. C. T. van der Laan, K. J. Prasinski, G.J. Zanstra, and P. de Jong, "A fast pulsed power source applied to treatment of conducting liquids and air," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, no. 1, pp. 137-143, 2000.
- [16] M. Gaudreau, T. Hawkey, J. Petry, and M. Kempkes, Solid-State power systems for Pulsed Electric Field (PEF) processing, presented at *IEEE Pulsed Power Conference*, Monterey, June 13-15, 2005.
- [17] J. F. Kolb, S. Kono, and K. H. Schoenbach, "Nanosecond pulsed electric field generators for the study of subcellular effects," *Bio Electro Magnetism*, vol. 27, no. 3, pp. 172-187, 2005.
- [18] C. Wang, Q.H. Zhang, and C. Streaker, "A 12 kV solid state high voltage pulse generator for a bench top PEF machine," presented at Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2000), Beijing, China, August 15-18, 2000.
- [19] Q. Zhang, G. V. Barbosa, and B. G. Swanson, "Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization," *Journal of Food Engineering*, vol. 25, pp. 261-281, 1995.
- [20] P. Sharma, P. Bremer, I. Oeya, and D.W. Everett, "Bacterial inactivation in whole milk using pulsed electric field processing," *International Dairy Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 49-56, 2014.

