

รายงานผลการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2541

เสนอคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



การออกแบบเครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบโดยการผสมสัญญาณแบบ
Integer-Cycle Binary Rate ที่เชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์
A Design of Temperature Measurement & Control Instrumentation for Oven
Using Integer-Cycle Binary Rate Based-on Microcomputer

RCH

TJ

1313

เลขหมู่..... 25825

เลขทะเบียน..... 40398

วัน, เดือน, ปี 14 ก.ย. 2544

b. 11105768
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานผลการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2541

เสนอคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เรื่อง

การออกแบบเครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบโดยการผสมสัญญาณ

แบบ Integer-Cycle Binary Rate ที่เชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์

A Design of Temperature Measurement & Control Instrumentation for

Oven Using Integer-Cycle Binary Rate Based-on Microcomputer

นายวิทยา ทิพย์สุวรรณพร หัวหน้าโครงการ
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขณะนี้ได้ทำบทความขึ้น 2 ฉบับ เรียบร้อยแล้วโดยใช้ชื่อว่า “การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้
การผสมสัญญาณ AC Line แบบ Integer-Cycle Binary Rate และ “การปรับค่าพลังงานสำหรับ
กระบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียด” ในวารสารประชุมทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า
ครั้งที่ 22 วันที่ 2-3 ธันวาคม 2542

การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้การผสมสัญญาณ AC Line

แบบ Integer-cycle Binary Rate

Temperature Control Using Integer-Cycle Binary Rate Modulation of the AC Line

วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

นิรัช โขชัย

มานะ นิฆมานพ

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการหนึ่ง ในการควบคุมอุณหภูมิในเตาอบให้คงที่ โดยอาศัยหลักการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate ขนาด 4 บิต กับสัญญาณไฟกระแสสลับ AC-Line การผสมสัญญาณจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ที่กำหนดให้มีการควบคุมแบบ PI (Proportional - Integral Mode) โดยนำอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ทำให้เกิดสัญญาณไฟกระแสสลับตามจำนวนของการคำนวณจากตัวควบคุม แล้วส่งต่อไปยังวงจรขับเพื่อกำหนดความร้อนในเตาอบ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องและมีความเสถียรภาพตลอดเวลา ระบบนี้สามารถจะพิจารณาผลตอบสนองต่อเวลาจากโมเดลของกระบวนการ ตัวควบคุม และลอจิกทิมของ Binary Rate นอกจากนี้ยังทำให้ผลของการควบคุมมี Ripple น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จากย่านการควบคุมอุณหภูมิ 40 ถึง 200 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

This paper presents the constant temperature controlled of the oven by using the mixed 4-bit binary rate with ac voltage from ac line. The transmitted signal is modulated with a signal from microprocessor Z-80. The operating system is digital PI with proportional intergal mode. The measured temperature from thermocouple will be compared with the setting temperature. The result is phase difference of ac line signal, it will be used as firing to produce the ac signal and pass to the driver circuit for generating heat in oven. This system determines the time response from the process model, controller, algorithm of binary rate the effect of controlling than 5% from the temperature range 40-200 °C.

1. บทนำ

ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีการใช้งานในปัจจุบันนั้นจะมีการออกแบบให้มีการควบคุมเฟสหรือควบคุมมุมทริกเพื่อให้ได้สัญญาณไฟสลับตามจำนวนของการทริกส่วนเทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulation) นั้นจะมีความคล้ายกับการสร้างสัญญาณด้วยการควบคุมมุมทริก จะเห็นได้ว่าเป็นการชกที่จะควบคุมการ on-off ทุกๆสัญญาณไฟสลับดังนั้นบทความนี้จะหาทางควบคุมสัญญาณไฟสลับด้วย BRM (Binary rate modulation) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำสัญญาณไฟสลับตามการกำหนดของสัญญาณการความถี่ที่ใช้ในการทริก โดยออกแบบควบคุมอุณหภูมิในเตาอบด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ให้ผลตอบสนองเร็วโดยไม่จำเป็นต้องใช้ D เข้าไปช่วย ที่ใช้ตัวตรวจวัดในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้เป็นสัญญาณไฟที่ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด J ซึ่งมีย่านอุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 750 องศาเซลเซียส สำหรับบทความนี้จะอาศัยหลักการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate ขนาด 4 บิต กับสัญญาณ AC Line มาเป็นตัวกำหนดควบคุมอุณหภูมิในเตาอบให้คงที่ด้วย Integer Cycle จำนวนทั้งหมด $2^4 = 16$ ไชเคิลที่ใช้สัญญาณนาฬิกา 10 KHz ตามการกำหนดย่านอุณหภูมิในการใช้งานที่มีหน่วยควบคุมทำการคำนวณจำนวนของสัญญาณไฟกระแสสลับ 0-15 ไชเคิล จำนวนลูกคลื่นไฟสลับจะส่งไปยัง Triac ทำให้ตัวทำความร้อนในเตาอบมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากหลักการพื้นฐานในการควบคุมการทำงานในวิธีการนี้ จะเป็นการช่วยในการกำหนดจำนวนสัญญาณรูปคลื่นไฟสลับโดยตรงที่จะส่งไปยังขดลวดผลิตความร้อนซึ่งเป็นผลดีในการตอบสนองและการประหยัดพลังงานจึงทำให้สามารถตั้งเป้าหมายควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการได้ ส่วนการแสดงผลจะเป็นองศาเซลเซียส สามารถตั้งอุณหภูมิเป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่งและยังมีเสถียรภาพในการควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ

2. ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันเชื่อมต่อกันที่ปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองดังสมการที่ 1

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

$$E_T' = 50.37T + 3.043 \times 10^{-2} T^2 - 8.567 \times 10^{-5} T^3 + 1.335 \times 10^{-7} T^4 \quad (1)$$

โดยที่ E_T' คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด J เมื่ออุณหภูมิอ้างอิง 0 °C จากสมการ (1) เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นตามไปในระบบนี้จะเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเพราะเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตสูงและย่านการวัดอุณหภูมิสามารถวัดได้สูง 0 - 750 องศาเซลเซียส พิกัดของค่าผิดพลาด 2.2 หรือ 0.75%

2.2 การควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Mode)

กรีขของการควบคุมแบบนี้จะประกอบด้วยการควบคุมแบบ P ซึ่งค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของความคลาดเคลื่อน ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะสูงขึ้นตามด้วยเหตุนี้จึงเกิด offset ขึ้นเมื่อค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยๆ ในกรณีนี้จึงต้องเพิ่มเติมของการควบคุมเข้าไปเราเรียกเทอมนี้ว่า Integral หรือการควบคุมแบบ Reset เมื่อมีการควบคุมแบบ PI จะทำให้เวลาในการตอบสนองช้าลง โดยทั่วไปจำเป็นจะต้องเพิ่ม D เพื่อเข้าไปเร่งผลตอบสนอง แต่ในบทความนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องใส่พารามิเตอร์ D เพราะว่ามีแนวทางที่จะทำให้ผลตอบสนองของเอาต์พุตเร็ว ด้วยการใส่เทคนิคการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate เข้ามาช่วย ดังนั้นจึงใช้การควบคุมแบบ PI ดังสมการ 2 หรือ 3

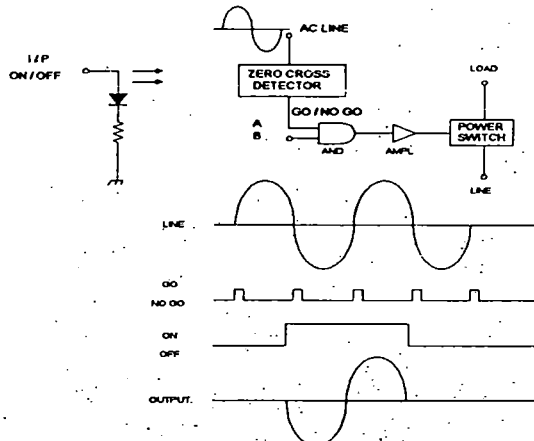
$$m(t) = \bar{m} + K_c [r(t) - c(t)] + (K_c / T_i) \int [r(t) - c(t)] dt \quad (2)$$

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + (K_c / T_i) \int e(t) dt \quad (3)$$

เมื่อ T_i = Integral หรือ Rest Time

นั่นคือ PI Controller จะมี 2 ตัวแปรคือ K_c และ T_i ที่ใช้ปรับแต่งในการควบคุมความต้องการ ส่วนค่า \bar{m} กำหนดให้ 25%

2.3 หลักการทำงานของ การผสมสัญญาณแบบ Integer - cycle Binary Rate กับไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการผสม Binary Rate การใช้งาน และ N=4 เป็นจำนวน Binary ของตำแหน่งบิต และส่วนดำเนินการคำนวณ

กับไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าอินพุต A เป็นตัวรับสัญญาณไฟกระแสสลับจาก AC Line ผ่านวงจร Zero Cross Detector โดยสร้างพัลส์ให้เกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณไฟกระแสสลับเป็นศูนย์ นั่นคือเกิดพัลส์ GO และ NOGO GO กำหนดให้สัญญาณไฟกระแสสลับผ่านไปได้ในช่วงที่เป็นศูนย์ จากนั้นไปเข้าขงอินพุตข้างหนึ่งของ AND Gate เพื่อที่จะให้มีการผสมสัญญาณกับ Binary ที่ส่งมากับตัวควบคุมผ่านเข้าที่จุด B เพื่อใช้ในการเปิด Gate ของ AND Gate ในช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตในหนึ่งไซเคิล

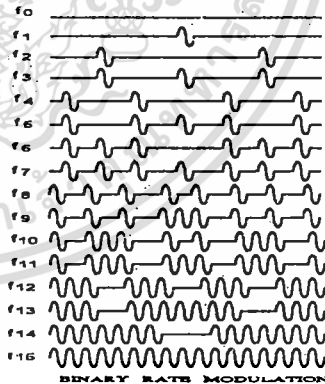
จากหลักการของ Binary Rate Modulation ผลตอบสนองของเอาต์พุตจะมีสัญญาณ 4 รูปแบบที่เป็นอิสระคือ 1, 2, 4, 8 ของสัญญาณ AC Cycle และสัญญาณทั้งหมดนี้สามารถกระทำด้วยสมการ Linear Combination ของทั้ง 4 โดยแต่ละไซเคิลของสัญญาณนี้สามารถเขียนเป็นสูตรอย่างง่ายดังสมการที่ (4) โดยผลแต่ละไซเคิลจะสุได้จากรูปที่ 2

$$f_2^a = \sum_{b=0}^{2^N-1} u(t) - \left(\frac{2^N}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^a}{2^a} \right) T - u \left(t - \frac{2^N}{2^{a+1}} + b \frac{2^a}{2^a} \right) T \sin(\omega t) \quad (4)$$

U(t) คือ Unit Step Function

ω คือความถี่ของไฟกระแสสลับ

a คือค่าของ Binary = 0,1,.....N-1



รูปที่ 2 แสดงรูปแบบสัญญาณ Binary rate modulation

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าการผลิตสัญญาณ BRM จะมีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 1 ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่สัญญาณของแต่ละลูกคลื่นที่ต่อเนื่อง คือ f0, f1, f2, f15 และจำนวนของ AC cycle สามารถแทนด้วยสมการที่ (5)

$$d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0 \quad (5)$$

โดยที่ d หมายถึง Binary bit ของหมายเลขสัญญาณ

เทอร์โมไดนามิกส์ของเตาอบให้ความร้อน สามารถเขียนคั้งสมการคั้งนี้

$$Q(t) = mc_h \frac{dC(t)}{dt} + k_h AC(t) \quad (6)$$

เมื่อ $Q(t)$ = ความร้อนชั่วขณะที่เกิดขึ้น

$C(t)$ = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิชั่วขณะกับอุณหภูมิโดยรอบ

m = มวลของเตาอบ

Ch = ความจุความร้อนจำเพาะ

A = พื้นที่ภายนอก

kh = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

จากสมการที่ (6) สามารถแปลงเป็น Laplac domain

จะได้

$$\frac{C(s)}{Q(s)} = \frac{1}{\frac{mc_h}{k_h A} s + 1} = \frac{K_p}{sT_p + 1} \quad (7)$$

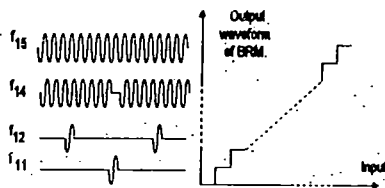
เมื่อ K_p หรือ $\left(\frac{1}{KhA}\right)$ คือ dc gain ของ plant และ T_p

หรือ $\left(\frac{mc_h}{k_h A}\right)$ คือ ค่า Time Constant

ในการพิจารณาอินพุตที่เป็นพัลส์กระทำกับเตาอบจากหน่วยพลังงานต่อไซเกิ้ล ด้วยเวลาเปิด aT และเวลาปิด bT ดังนั้น เฮอร์ซัท Ripple ในสภาวะคงตัวของอุณหภูมิจะเป็นคั้งสมการคั้งต่อไปนี้

$$K_p = \frac{(1 - e^{-aT/T_p})(1 - e^{-bT/T_p})}{1 - e^{-(a+b)T/T_p}} \quad (8)$$

Ripple สามารถกำหนดด้วยความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของผลคอบสนองสภาวะคงตัวที่กระทำจากอินพุตพัลส์และคาบเวลา T ของ AC Cycle สำหรับกรณีนี้ให้ $T/T_p = 0.01, N = 4$ จะทำให้ Ripple ที่เฮอร์ซัทไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาวะของเฮอร์ซัทนั้นเมื่อมีการป้อนสัญญาณ BRM จะแสดงคั้งรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงสภาวะของเฮอร์ซัทจากอินพุต Binary rate Modulation

3 โครงสร้างของระบบและการออกแบบ

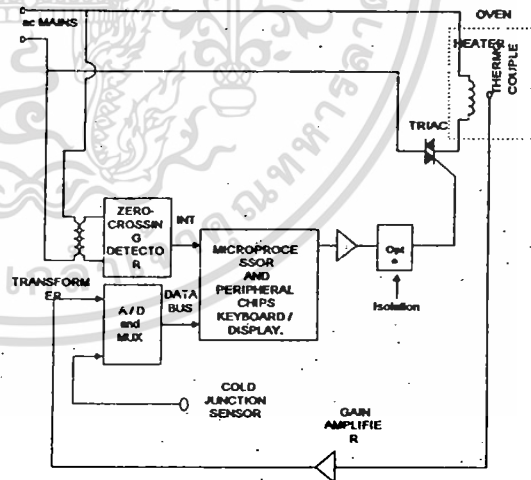
3.1 หลักการทำงานของระบบ จะประกอบไปด้วยหน่วยคั้งๆที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบแสดงคั้งรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยหน่วยคั้งๆ คั้งคั้งไปนี้

3.1.1 หน่วยควบคุมหลัก ทำหน้าที่ในการประมวลผลได้แก่ การแสดงผล การรับข้อมูลจากคั้งบอร์ดและรับข้อมูลจากภายนอกเข้ามา ทำการสร้างสัญญาณ Binary Rate ที่ใช้กำหนดสัญญาณเฮอร์ซัท และควบคุมการทำงานในรูป เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คั้งที่

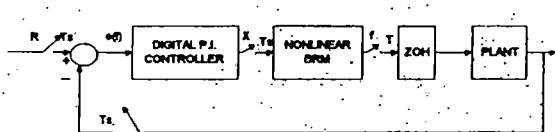
3.1.2 วงจร A/D และ MUX เป็นคั้งแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล และวงจร MUX เป็นคั้งรวมสัญญาณอินพุตคั้งๆ จากภายนอก เช่นสัญญาณอุณหภูมิอ้างอิงที่ $0^\circ C$ (Cold Junction Sensor) สัญญาณอุณหภูมิจากเตาอบที่วัดด้วยเทอร์โมคั้งปี้

3.1.3 หน่วย Zero Crossing Detect ใช้ในการตรวจจับสัญญาณไฟกระแสดับขนาดคั้งของคั้งละรูปคั้งให้คั้งเป็นสัญญาณพัลส์ เพื่อป้อนเป็นสัญญาณอินเตอร์รัฟให้กับหน่วยควบคุมหลักสร้างฐานคาบเวลา T

3.1.4 หน่วย Power Stage ทำหน้าที่จ่ายพลังงานกับขดลวดความร้อน เพื่อทำให้เกิดความร้อนในเตาอบโดยใช้โซลิตสเคทรีเลย์



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ของระบบ



รูปที่ 5 แสดงบล็อกโคอะแกรมของการควบคุมแบบรูปปิด

จากรูปที่ 5 เมื่อให้ Sampling rate ของตัวควบคุม $T_s = (2^n - 1)T$ และกำหนดให้อุปกรณ์ Zero Order hold (ZOH) รวมอยู่กับ Plant ที่ได้จากสัญญาณการกระตุ้นดังนั้นในการปรับตัวควบคุมที่เหมาะสมจึงเลือกตัวควบคุมแบบ PI เพื่อที่จะกำจัดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวซึ่งตัวควบคุมสามารถที่เขียนเป็น Transfer function ดังนี้

$$K_c \left\{ \frac{1 + T_s / T_i - Z^{-1}}{1 - Z^{-1}} \right\} \quad (9)$$

ใน Z-domain K_c คือ Gain การขยายของตัว Controller ส่วน T_i เป็น reset time ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันจะได้สมการดังนี้

$$K_p \frac{(1 - e^{-T_s/T_p})}{(z - e^{-T_s/T_p})} \quad (10)$$

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{K_c K_d K_p \left\{ \frac{1 + T_s/T_i - z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right\} \frac{(1 - e^{-T_s/T_p})}{(z - e^{-T_s/T_p})}}{1 + K_c K_d K_p \left\{ \frac{1 + T_s/T_i - z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right\} \frac{(1 - e^{-T_s/T_p})}{(z - e^{-T_s/T_p})}} \quad (11)$$

$$(z-1)(z-a) + K(z(1+T_s/T_i) - 1) = 0 \quad (12)$$

จากสมการ (12) เมื่อมีการเปลี่ยน Step อินพุตด้วยขนาด R ซึ่งมีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ใน z - domain โดยการใช้ทฤษฎีการหาค่าสุดท้ายเพื่อหาผลตอบสนองในสถานะคงตัวของ C(s) ที่มีค่าเท่ากับ R ดังนั้นโดยการตรวจสอบสถานะเริ่มต้นจากสมการคุณลักษณะ (12) กำหนดให้ $a = e^{-T_s/T_i}$ และ $K = K_c K_d K_p (1-a)$ เมื่อกำหนดค่า T, T_p, K_p, K_d สามารถที่จะพล็อต root loci ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของค่า T_i สำหรับการพิจารณาผลตอบสนองจากระบบการควบคุมรูปปิด ดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดค่า Gain สูงๆ เพื่อใช้สำหรับ BRM นั้นจะทำให้ลูปสัญญาณรบกวนและมีผลตอบสนองต่อสถานะเริ่มต้นอย่างรวดเร็วกับระบบรูปปิดดังกล่าว

เนื่องจากตัวควบคุมที่ใช้เป็นตัวควบคุมแบบ PI จากรูปที่ 4 นั้นค่าอินพุตของตัวควบคุมเป็น X สามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ

$$X(nT_s) = K_c [e(nT_s) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^n e(iT_s)] \quad (13)$$

$e(nT_s)$ คือค่าความผิดพลาดระหว่างจุดหมุมที่วัดเข้ามา กับจุดหมุมที่กำหนดไว้ ส่วน K_c และ T_i สามารถที่จะแก้ไขเปลี่ยนแปลงโดยผ่านทางคีย์บอร์ด

เมื่อได้ค่าอินพุตทุกตามสมการ (13) จะนำค่าที่ได้ไปสร้าง ความถี่ตามสมการที่ (4) จะได้เอาท์พุตเป็นความถี่ $f(nT)$ เพื่อส่งไปเป็นสัญญาณทริกให้กับ Triac ซึ่งจะทำได้ตามร่นาสัญญาณไฟสลับได้เต็มลูกคลื่นตามจำนวนการส่งความถี่ดังกล่าว โดยที่ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ plant คือ

$$\frac{K_p}{T_p} \left(\frac{1}{1 - e^{-T/T_p} z^{-1}} \right) \quad (14)$$

เมื่อส่งความถี่ $f(nT)$ ไปทริก Triac จะทำให้ได้ความร้อนตามสมการ (15)

$$c(nT) = \frac{K_p}{T_p} [f(nT) + e^{-T/T_p} c(nT - T)] \quad (15)$$

$f(nT)$ คือ จำนวนความถี่สูงสุดที่ใช้ในการทริก Triac

ในแต่ละช่วงของไฟสลับ

$c(nT)$ คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากความถี่ทริกสูงสุด

4 การออกแบบฮาร์ดแวร์

-ในระบบนี้จะใช้ Microprocessors Z-80 ควบคุมการทำงานและตัดสินใจในการควบคุมพัลส์และควบคุมการทำงานในรูป เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่

-หน่วย input & Output Port ใช้ในการติดต่อระหว่างระบบกับอุปกรณ์ต่างๆด้วยพอร์ท 8255

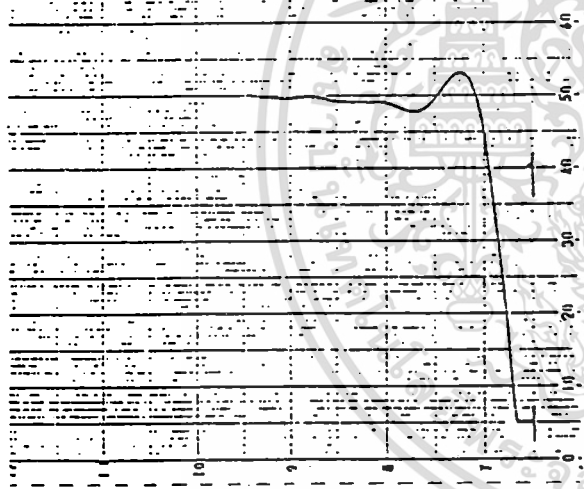
-A/D Converter เป็นหน่วยที่เปลี่ยนสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital โดยใช้ไอซี ADC0809 ขนาด 8 บิต ซึ่งจะรับสัญญาณมาจากเทอร์โมคัปเปิ้ล กับสัญญาณอ้างอิงผ่านวงจร MUX โดยใช้ไอซี 74LS138 กับ MC14051

-เทอร์โมคัปเปิ้ล ที่ไว้วัดอุณหภูมิในเตาอบเป็นชนิด J สัญญาณที่ได้นำไปขยายด้วย ไอซี LM308A มีเอาท์พุตที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งในวงจรนี้มีค่า $\geq 10\text{mv}/^\circ\text{C}$ เพื่อป้อนให้กับวงจร A/D -วงจร BRM ที่ใช้ในการผสมสัญญาณ Binary ขนาด 4 bit กับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากในทฤษฎีหัวข้อ 2.3 ที่กล่าวถึงหลักการของ BRM ในทางปฏิบัติสามารถออกมาออกแบบสร้างดังรูปที่ 6 โดยใช้วงจรจับนำ Triac ให้สัญญาณผ่านเข้าสู่จุดตรวจความร้อนตามการผสมสัญญาณ Binary โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือสัญญาณ Binary ที่กำหนดมาจาก Microprocessor ส่งผ่าน

IFT ทำให้ LED เกิดแสงสว่างไปจุดชนวน TRIAC โดยวงจร และห้องอย่างง่ายถึงใจของเอกสารที่สงวนไว้เพื่อ

6 ผลการทดลอง

นำเครื่องที่ได้ออกแบบนี้ไปควบคุมเตาอบขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ที่มีระบบการหมุนเวียนที่ให้อุณหภูมิในเตาอบเท่ากันตลอด โดยที่เตาอบตัวนี้สามารถสร้างความร้อนสูงสุด 250 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบเพื่อหา T_p โดยการป้อนอินพุตแบบ Step ที่อุณหภูมิสูงสุดจะได้ค่า T_p ประมาณ 350 วินาที จากนั้นนำค่า T_p ไปคำนวณหาค่า T ($T=0.01T_p$) ซึ่งมีค่ากับ 35 วินาที แล้วนำค่า T_p ที่ได้ไปหาค่า T_r ($T_r=(2^4-1)T$) จะได้ $T_r=525$ วินาที ซึ่งเป็นอัตราการ Sampling ของตัวควบคุม จากสมการ(9) นั้นลองกำหนดให้ $K_c=5$ $T_r=3$ วินาที โดยนำไปทดลองควบคุมที่มีการกำหนด set point ไว้ที่ 50 % ซึ่งมีค่าอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กำหนดไว้เป็นแบบ Step ดังผลการทดลองในรูปที่ 9 โดยใช้เวลาในการควบคุมประมาณ 3 นาที



รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองของเตาอบเมื่อมีการกำหนด

อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

7 สรุป

การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้หลักการผสมสัญญาณ Binary rate Modulation กับสัญญาณไฟกระแสดับอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมอยู่ในย่านอุณหภูมิ 40-200 องศาเซลเซียส จากการทดลองการควบคุมอุณหภูมิโดยอาศัยตัวควบคุมแบบ PI จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้กับอุณหภูมิที่วัดได้จะเกิดผลการตอบสนองในทุกพื้นที่ทั้งหมดของเตาอบด้วยจะเกิดสภาวะเริ่มต้นสูงสุด 4 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงที่ สำหรับการขยายย่านการควบคุมขึ้นอยู่กับขนาดของเตาอบที่จะผลิตความร้อนได้ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถจะกำหนดเปอร์เซ็นต์ Ripple ด้วยอัตราส่วน $T / T_p \ll 1$ ถ้าทำการเพิ่ม N ให้มากกว่า 4 หรือเพิ่มความถี่ของสัญญาณนาฬิกา จะมีผลทำให้การควบคุม

อุณหภูมิมีความละเอียดที่มากขึ้นและมีผลตอบสนองที่เร็วกว่านี้ได้

8 เอกสารอ้างอิง

[1] B. W. Lingard, R. W. Johnson, and W. Shepert, "Analysis of thyristor controlled, single-phase loads with integral-cycle triggering," Proc. IEEEL, vol 117, no. 2, pp. 607-608, Mar. 1970.

[2] H.M.EI-Bolek and S. S. Abd-EI-Hamid, "A microprocessor adjusting system for integral cycle power control of RL load," IEEE Tran. Ind. Electron., vol 37, no 2 pp. 156-160, Apr. 1990

[3] Texas Instrument TTL catalogue, Bulletin no. DL S 7611802, Oct. 1976.

[4] E. McCarthy and J. Danash, "A novel method of direct digital cycle power control," IEEE Trans. Ind. Electron. contr. Instrum, vol IECI-25, no. 2, pp. 147-154, May 1978

การปรับค่าพลังงานสำหรับกระบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียด

Fine Adjustment Energy For Filament Heating Process

วิทยา ทิพย์สุวรรณพร* จรินทร์ นาดโพธิ์จร* เวทิน ปิยรัตน์** นิรัช ไซรัช*** และ โคมศ แจ่มจันทร์***

* คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

*** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

บทความนี้ขอเสนอการปรับค่าการจ่ายพลังงานในกระบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียดโดยอาศัยวิธีการ Integral-Cycle Binary Rate Modulation (IBRM) หลักการวิธีนี้เกิดจากการนำสัญญาณ Binary Rate Multiplier (BRM) ขนาด 8 บิต ผสมกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ AC LINE ความถี่ 50 Hz ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจำนวน 2048 รูปแบบ ไปกำหนดการปรับค่าพลังงานแบบละเอียดให้แก่อุปกรณ์ทุกๆ 20 มิลลิวินาที โดยแบ่ง T_s (Scan Time) ออกเป็น 8 ส่วนๆละ 2.5 มิลลิวินาที ที่กำหนด IBRM ได้ 256 รูปแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการปรับค่าพลังงานละเอียดและมีเสถียรภาพเป็นอย่างดี

Abstract

This paper proposes the fine value adjustment for generating heat energy to filament by using 8 bits Integral-Cycle Binary Rate Modulation (IBRM). This principle uses 8 bits BRM modulating with 50 Hz AC signal that gives AC signal 2048 patterns for fine-controlling the energy adjustment to filament every 20 ms. By deviding Scan Time (T_s) in 8 parts, each part uses 2.5 ms for defining 256 patterns. The results show that this technique has well stability.

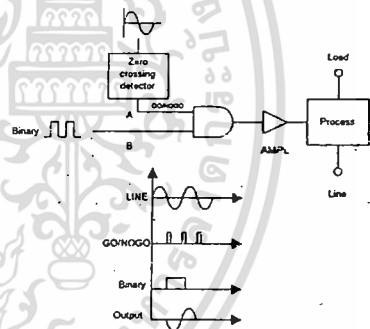
1. บทนำ

ขบวนการการทำความร้อนโดยใช้ไส้หลอดในอดีต ระบบการจ่ายพลังงานขึ้นอยู่กับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมากระนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบจัดการการจ่ายพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในการปรับพลังงานสำหรับขบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียดก่อให้เกิดประโยชน์ในการประหยัดพลังงานที่จ่ายกับไส้หลอดอย่างเหมาะสม ในการจ่ายพลังงานแบบละเอียดนี้จะใช้เทคนิคการปรับค่าพลังงานแบบละเอียดด้วยวิธีการ Integral Cycle Binary Rate Modulation

ความละเอียดของ IBRM จะส่งผลทำให้ค่าของ Ripple ในการจ่ายพลังงานมีค่าน้อยลง ซึ่งจะส่งผลดีกับการนำไปใช้ควบคุมอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆได้แก่การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับหรือควบคุมอุณหภูมิความร้อนจากตัวทำความร้อน เป็นต้น

2. ทฤษฎีการทำงาน

2.1 หลักการพื้นฐานของการผสมสัญญาณ IBRM



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการผสม Binary Rate กับไฟกระแสสลับ

รูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าอินพุต A เป็นตัวรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจากสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ พัลส์ GO กำหนดให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับผ่านไปได้ ในช่วงที่เป็นศูนย์จากนั้นไปเข้ายังอินพุตข้างหนึ่งของ AND Gate เพื่อให้มีการผสมสัญญาณกับ Binary ที่มาจากตัวคุมผ่านเข้าที่จุด B เพื่อเปิด Gate ของ AND Gate ในช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตในหนึ่งไซเคิล จากหลักการผสมสัญญาณแบบ IBRM ผลตอบสนองของเอาต์พุตจะมีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 8 รูปแบบอิสระคือ $f_1, f_2, f_4, f_8, f_{16}, f_{32}, f_{64}, f_{128}$ กระทำด้วยสมการ Linear Combination จากความถี่ 8 รูปแบบข้างต้นด้วยสมการที่ (1) และผลของแต่ละไซเคิลดูได้จากรูปที่ 1

$$f_{out} = \sum_{n=1}^{2^m-1} \left[u \left(t - \left(\frac{2^n}{2^{m+1}} - 1 + b \frac{2^n}{2^m} \right) T \right) - u \left(t - \left(\frac{2^n}{2^{m+1}} + b \frac{2^n}{2^m} \right) T \right) \right] \sin \omega t \dots (1)$$

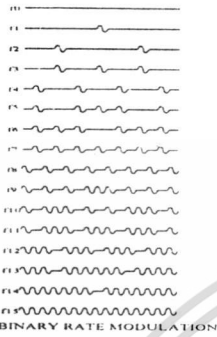
การปรับค่าพลังงานสำหรับกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุแบบอะเดียติก

$u(t)$ คือ Unit Step Function

ω คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

a คือ ค่าของ Binary = 0, 1, ..., N - 1

T คือ ฐานเวลาของ BRM



รูปที่ 2 รูปแบบสัญญาณ BRM ขนาด 4 บิต

จากรูปที่ 2 การผลิตสัญญาณ IBRM จะมีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 1 ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่สัญญาณของแต่ละลูกคลื่นที่ต่อเนื่องคือ $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{255}$

$$F = d_7 2^7 + d_6 2^6 + d_5 2^5 + d_4 2^4 + d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0 \dots (2)$$

d คือ Binary bit ของหมายเลขสัญญาณ Binary Rate

โดยที่ F เป็นจำนวนพัลส์ที่ส่ง และ $d_7, d_6, \dots, d_1, d_0$ คือไบนารีของ F ถ้ากำหนดให้ 2^{11} คือผลรวมของจำนวนพัลส์ต่อไซเคิล และ R คือ ค่าพลังงานในแต่ละพัลส์ของคาบเวลา T เมื่อ $T_s = (2^{11})$ คือ Scan time ดังนั้นกำลังเฉลี่ยกำหนดได้ดังสมการ

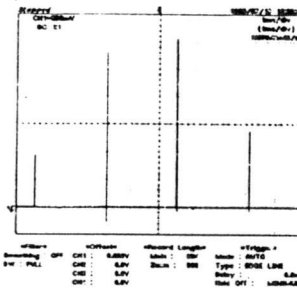
$$P_i = \sum_{i=1}^n \frac{F_i R_i}{T_s} \dots (3)$$

F_i คือจำนวนรูปแบบของ IBRM

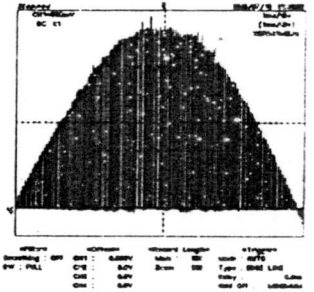
R_i คือจำนวนค่าพลังงานในแต่ละรูปแบบของ IBRM ของคาบเวลา

T_s คือจำนวนคาบเวลาในแต่ละส่วน

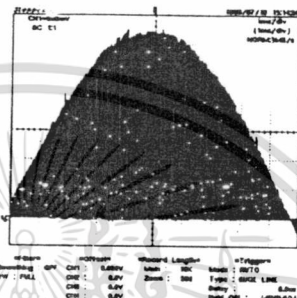
จากสมการที่ 3 จะเห็นว่ากำลังเฉลี่ยที่จ่ายพลังงานให้กับไส้หลอดตามช่วงคาบเวลาในแต่ละส่วนนั้นเกิดขึ้นจากจำนวนรูปแบบของสัญญาณ BRM ที่กำหนดให้มีการกระจายรูปแบบตามช่วงเวลา T_s ด้วยการกำหนดความถี่หลักเป็น Linear Independence Waveforms ดังนั้นคือ $f_1, f_2, f_4, f_8, f_{16}, f_{32}, f_{64}$, และ f_{128} ที่อิสระต่อกันมีการนำ Linear Combination ดังรูปแบบของ IBRM รูปที่ 3



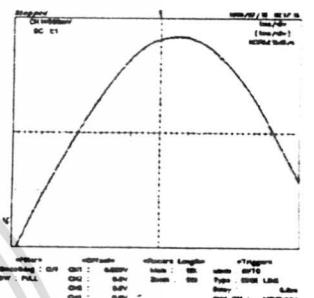
(ก) IBRM รูปแบบ f_1



(ข) IBRM รูปแบบ f_2



(ค) IBRM รูปแบบ f_{64}



(ง) IBRM รูปแบบ f_{255}

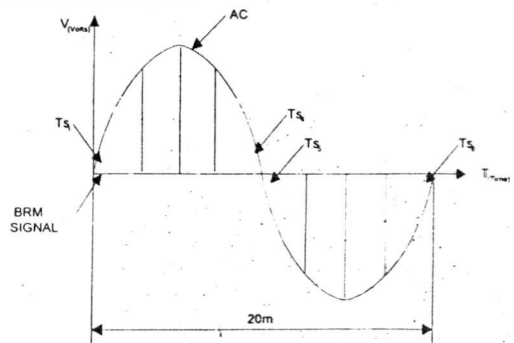
รูปที่ 3 สัญญาณ IBRM ในรูปแบบต่างๆ แสดงครึ่งไซเคิลบวกเท่านั้น

ถ้าพิจารณาการจ่ายพลังงานต่อไซเคิลของ Pulse Train ที่จ่ายให้กับไส้หลอดด้วยการ ON time "aT" และ OFF time "bT" ของเกาท์พุทในสภาวะคงตัวกำหนดได้จากสมการหา Ripple ในสมการที่ (4)

$$Ripple = \frac{K_p \left(1 - e^{-aT/T_p}\right) \left(1 - e^{-bT/T_p}\right)}{\left(1 - e^{-(a+b)T/T_p}\right)} \dots (4)$$

โดยที่ Ripple คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของการเชื่อมสองในสภาวะคงตัวต่อ Pulse Train ซึ่งผลของ Ripple ตามสมการ (4) จะต้องให้อัตราส่วนของ $T/T_p < 0.001$

2.2 การจ่ายพลังงาน IBRM

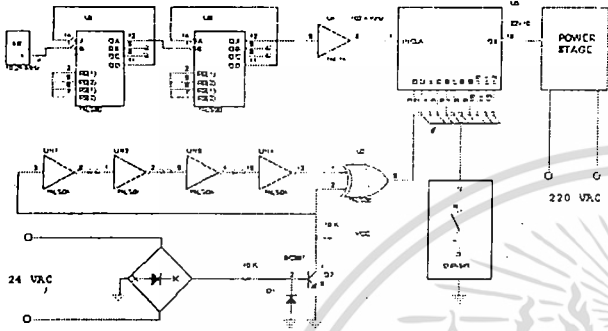


รูปที่ 4 แสดงการจ่ายพลังงานใน 1 ไซเคิล

การปรับค่าพลังงานสำหรับกระบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียด

จากรูปที่ 4 T_s (scan time) จะประกอบด้วย 8 ส่วน ในทุกๆ 20 มิลลิวินาที ของการจ่ายพลังงาน ในแต่ละส่วนๆละ 2.5 มิลลิวินาที ภายใต้อำนาจ IBRM ได้ 256 รูปแบบ สำหรับจ่ายพลังงานแบบละเอียดให้กับไส้หลอดจาก $T_{s1}, T_{s2}, \dots, T_{s8}$ ตามลำดับ

3. วงจรการสร้าง IBRM



รูปที่ 5 วงจรสมบูรณ IBRM

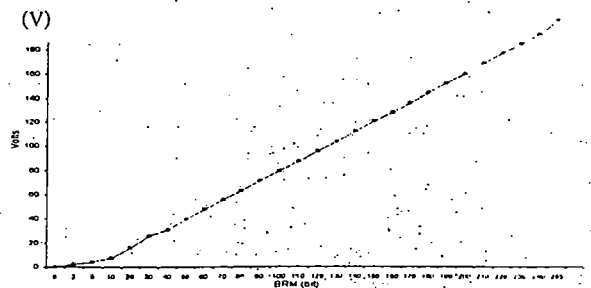
จากรูปที่ 5 โครงสร้างของระบบจะประกอบด้วยหน่วยต่างๆ ของระบบทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ หน่วย IBRM จะสร้างสัญญาณ IBRM เพื่อจ่ายพลังงานที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพให้กับไส้หลอด ส่วนวงจร Zero Crossing Detector จะกำหนดจุดตัดศูนย์ที่ขอบขาลงสัญญาณ เพื่อนำไปกำหนดจุดเริ่มต้นในการสร้างสัญญาณ IBRM ในแต่ละไซเคิลของสัญญาณไฟกระแสสลับ ส่วนวงจร Power Stage จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับไส้หลอดเป็นต้น

4. ผลการทดลอง

ทำการทดสอบไส้หลอดความร้อนแบบ Tungsten Filament ความต้านทานไส้หลอดเท่ากับ 20 โอห์ม ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ 220 VAC 50 Hz ขานพลังงานในการจ่าย 0 ถึง 250 W การทดสอบจ่ายพลังงาน แบบละเอียดกับไส้หลอดกำหนดรูปแบบของ IBRM รูปแบบต่างๆ จากค่า IBRM ค่าสุด ไปจนถึงค่า IBRM สูงสุด นำผลที่ได้ทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไส้หลอด และกระแสที่ไหลผ่านไส้หลอด เพื่อพิจารณาผลของการจ่ายพลังงานแก่ไส้หลอดเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงตามการปรับแบบละเอียดตามรูปแบบของ IBRM ซึ่งได้ผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 6, 7, 8 ตามลำดับ

IBRM	VA	V	A
30	4.3	26	0.165
40	6.3	31	0.197
50	9.4	40	0.236
60	12.8	48	0.268
70	17	56	0.303
80	21.3	63.3	0.335
90	27	72	0.366
100	32	80	0.4
110	38	88	0.428
120	44	96	0.46
130	50.5	104	0.49
140	58	112.5	0.52
150	67	121	0.545
160	73	128.5	0.572
170	82	136.5	0.6
180	91	145	0.625
190	99.5	153	0.653
200	109	161	0.68
210	119	170	0.703
220	129	178	0.728
230	139	185	0.758
240	149	193	0.775
255	166	205	0.812

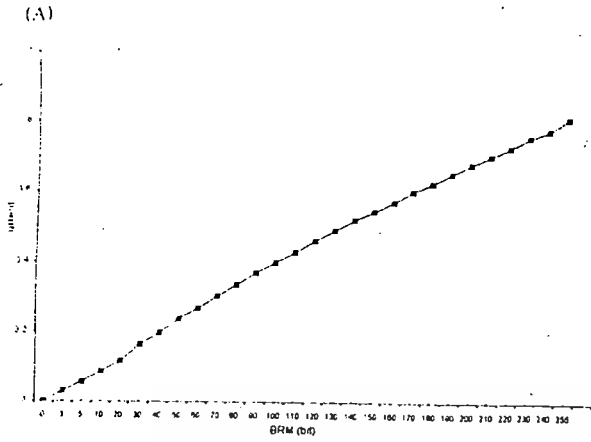
ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ไส้หลอด



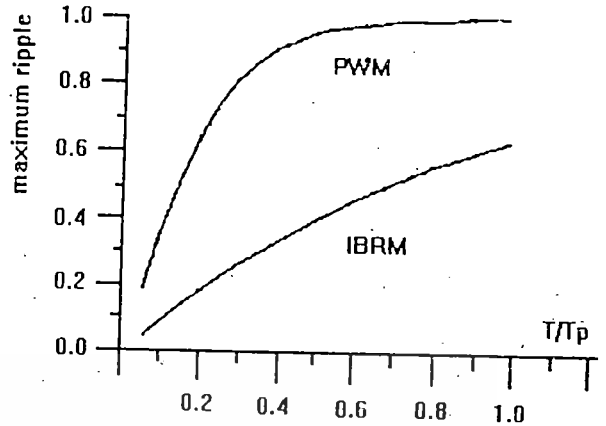
รูปที่ 6 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไส้หลอดความร้อน

IBRM	VA	V	A
0	0	0	0
10	0.5	7.5	0.068
20	1.8	16	0.115

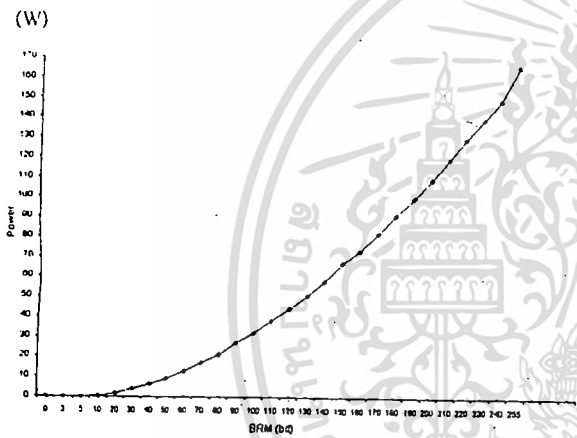
การปรับค่าพลังงานสำหรับกระบวนการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดแบบละเอียด



รูปที่ 7 ผลการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอด



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่า Ripple สูงสุดจากการจ่ายพลังงานแบบ PWM กับแบบ IBRM ที่อัตราส่วน T/Tr



รูปที่ 8 ผลการวัดพลังงานที่จ่ายให้กับไส้หลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.M. EL - BOLEK and SAMIR S. ABD - EL - HAMID, " A Microprocessor-Based Self - Adjusting System for Integral Cycle Power Control of RL Loads" IEEE Trans. On Ind. Elec, Vol.37, No.2,pp. 156 -159, April 1990.
- [2] Novel Barry and Eamonn McQuade " Temperature Control Using integer-Cycle Binary Rate Modulation of the AC Main" IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol.31, No.5, pp. 965-969, Sep.1995.
- [3] วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, นิรัฐ โชชัย, มานะ นิจมานพ " การควบคุม อุณหภูมิโดยใช้การผสมสัญญาณ AC Line แบบ Integral -Cycle Binary Modulation" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19 หน้า CT 36 - 41 2539.

5. สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่าเทคนิคการจ่ายพลังงานแบบละเอียดด้วยวิธีการของ IBRM สามารถที่จะจ่ายพลังงานให้กับไส้หลอดแบบ Tungsten ที่การทำงานเต็มพิกัด ตามการใช้งานที่แท้จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะการจ่ายพลังงานด้วย วิธีการของ IBRM ดังกล่าว สามารถกำหนดเปอร์เซ็นต์ Ripple ด้วยอัตราส่วน (T/Tr) , << 1 ถ้าสามารถเพิ่มจำนวนบิต (N) ให้มากกว่า 8 จะมีผลทำให้การจ่ายพลังงานให้กับไส้หลอดมีความละเอียดมากขึ้น และมีผลการตอบสนองที่เร็วขึ้น เมื่อค่า Ts เท่าเดิม และจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้การจ่ายพลังงานจะเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม ค่ากำหนดการจ่ายพลังงานจะกำหนดอย่างไร ก็ขึ้นอยู่กับกำนวนบิต และสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ จึงทำให้ผลของการตอบสนองการจ่ายพลังงานเร็ว และประหยัดพลังงานที่จ่ายให้กับไส้หลอดนอกจากนี้วิธีการของ IBRM ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการควบคุมหลอดที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ