

การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผัน  
แบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์  
Comparison of PWM Power Rectifier between 6 Pules and 12 Pules  
Converter Topology

ชาคริต วินิจธรรม<sup>1</sup> ฤกษ์ณัชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์<sup>2\*</sup> และ ณัฐภัทร พันธุ์คง<sup>3</sup>

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
จังหวัดฉะเชิงเทรา 22210

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>3</sup> อาจารย์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
จังหวัดปทุมธานี 12110

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กขนาด 20 kW เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ของทั้งสองแบบจะต่อเข้ากับด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และการควบคุมแรงดันด้านของวงจรเรียงกระแสที่ 700 V จะใช้การควบคุมแบบ Decoupling Control กับ Conventional PI Control โดยใช้เทคนิคการหาพารามิเตอร์การควบคุมแบบ Nicole-Ziegler การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองที่ได้พบว่าจะมีค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 5 % โดยสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยแบบ 12 พัลส์มีฮาร์มอนิกส์ที่ถูกบ่อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG น้อยกว่าแบบ 6 พัลส์ ซึ่งแนวทางการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงจรเรียงกระแสกำลัง PWM ในอนาคตได้

### Abstract

This paper presents a study of comparison of PWM power rectifier between 6 Pules and 12 Pules converter topology by small hydro turbine Generator (20kW) is power supply and Compare harmonics Current feed in the systems. Both converter connected Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and Voltage Regulator Control at 700 V. The control system by Decoupling Control and Conventional PI Control for control parameter PI value by Nicole-Ziegler method. Analysis for Performance of the system presented a mathematical model with Matlab/Simulink program. The result of simulation have value less than 5 percent of ripple voltage and Voltage Control continuously. Converter 12 pulse have harmonics Current value feed in the systems less than converter 6 pulse. This Case study can apply using PWM power rectifier control in future work

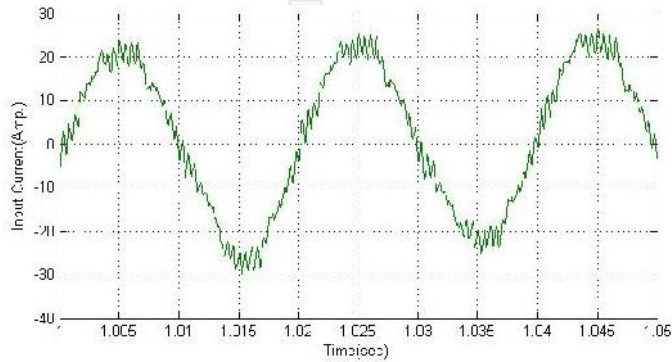
**คำสำคัญ** : วงจรเรียงกระแสกำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร การควบคุมพีไอ

**Keywords** : Power Rectifier, Permanent Magnet Synchronous Generator and PI Control

\*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ [krischonme.b@en.rmutt.ac.th](mailto:krischonme.b@en.rmutt.ac.th) โทร. 0 2549 3571

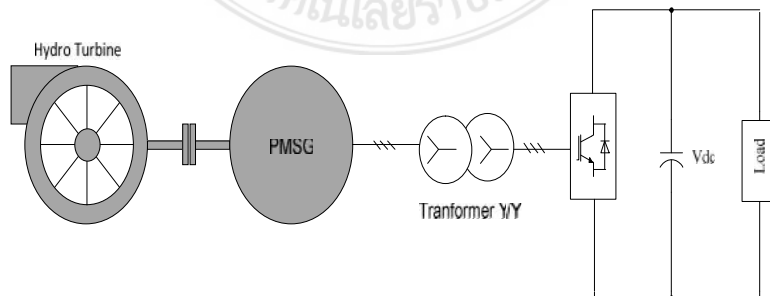
### 1. บทนำ

ปัญหาคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งหนึ่งในนั้นที่สร้างปัญหาให้กับระบบคือปัญหาฮาร์มอนิกสัในระบบไฟฟ้ากำลังและด้วยผลของฮาร์มอนิกสันี้ ทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะด้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม(distorted waveform) ซึ่งเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม เช่น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย ฯลฯจากปัญหาดังกล่าวทำให้ได้รูปคลื่นสัญญาณความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 1

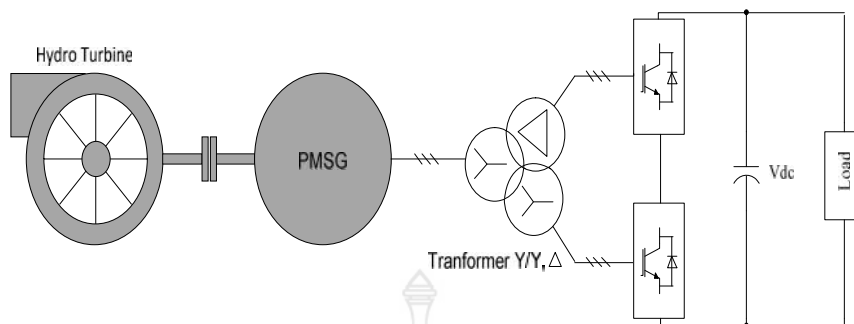


รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณความถี่ผิดเพี้ยนจากฮาร์มอนิกสั

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำเสนอบทความนี้ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กขนาด 20 kW เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกสัเข้าสู่ระบบ ระหว่าง ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ของทั้งสองแบบจะต่อเข้ากับด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และการควบคุมแรงดันด้านของวงจรเรียงกระแสที่ 700 V สำหรับเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Decoupling Control กับ Conventional PI Control เพื่อเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้โหลดหรือเข้าสู่กริดระบบ (Grid-connected system) โดยใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power converter)



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์



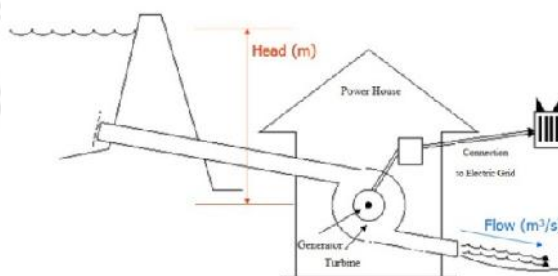
รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์

สำหรับแนวคิดของบทความที่นำเสนอจะใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากพลังงานน้ำโดยขั้วกังหันน้ำ(Hydro Turbine)และเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร(PMSG) แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม บนพื้นฐานของการควบคุมการทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแบบ 2 ขดลวดในโครงสร้างวงจรแปรผันแบบ 6 พัลส์และชนิดแบบ 3 ขดลวดในโครงสร้างวงจรแปรผันแบบ 12 พัลส์ โดยวงจรแปรผันแบบ 6 พัลส์จะมีการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ สตาร์-สตาร์ ส่วนวงจรแปรผันแบบ 12 พัลส์จะมีขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 ขดและขดลวดทุติยภูมิ 2 ขด ต่อแบบ สตาร์-สตาร์ และสตาร์-เดลต้า เพื่อให้แรงดันด้านออกของหม้อแปลง 2 ชุด ต่างเฟสกัน 30 ° ผ่านอุปกรณ์สวิตซิ่ง ด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ทั้งสองโครงสร้างจะใช้สัญญาณ PWM จ่ายให้ขาเกตของ IGBT ใช้วิธีการควบคุมแบบ พีโอ เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ สำหรับใช้จ่ายให้กับโหลดหรือระบบเชื่อมต่อกริด

## 2. วิธีการทดลอง

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ



รูปที่ 4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากพลังงานน้ำเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$P = gdQH \tag{1}$$

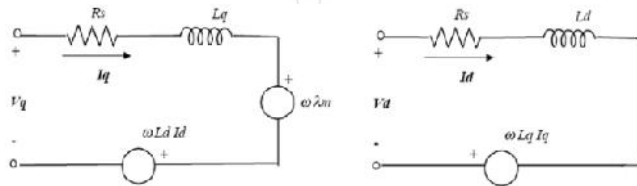
โดยกำหนดให้ P คือกำลังที่ได้จากน้ำ (วัตต์) Q คืออัตราการไหลของน้ำที่ผ่านกังหัน (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) g คือ ค่าความเร่งของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(9.807 เมตร-วินาที<sup>2</sup>) d คือความหนาแน่นของน้ำ(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) H คือความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ(เมตร)ปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เป็นดังสมการที่ 2

$$W = Ptnf \tag{2}$$

โดย W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้(กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) P คือ กำลังน้ำตก(กิโลวัตต์) t คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง) n คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ – เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5 – 0.9f คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในลำธาร

### 2.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร(PMSG)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร จะไม่มีชุดจ่ายกระแสไฟตรงเข้าไปกระตุ้นสนามแม่เหล็ก แต่ใช้สนามแม่เหล็กจากชุดแม่เหล็กถาวรแทน จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องมีแปรงถ่านและวงแหวน(Slip ring) ง่ายแก่การบำรุงรักษา และสมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงแกนนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4)



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของ PMSG ที่เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์

จากวงจรสมมูลจะได้สมการที่แปลงจากแกน abc เป็น dq ได้ดังนี้

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + \dot{S}_m (L_{dm} + L_{Ts}) i_{ds} + \dot{S}_m E_f \tag{3}$$

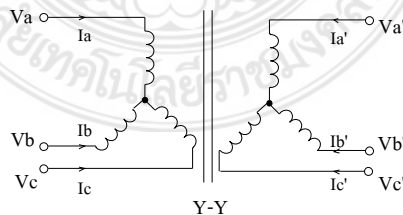
$$V_{ds} = -R_s i_{ds} - \dot{S}_m (L_{qm} + L_{Ts}) i_{qs} \tag{4}$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \tag{5}$$

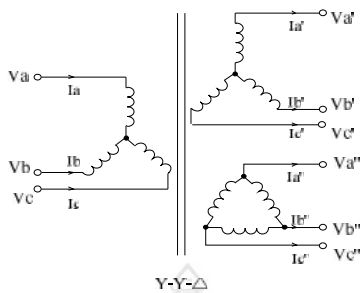
$$\tilde{P}_s = V_{qs} i_{ds} + V_{ds} i_{qs} \tag{6}$$

### 2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวดและ 3 ขดลวด



รูปที่ 6 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวด จะใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ และแบบ 3 ขดลวด ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ โดยจะต่อวงจรทางด้านปฐมภูมิเป็นแบบสตาร์และทุติยภูมิเป็นแบบสตาร์-เดลต้า ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 7 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หน้าที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ไม่ใช่เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแต่เป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้าชนิดสามเฟสขึ้นสองชุด จะมีมุมต่างเฟสกัน 30 องศา จึงทำให้เกิดเป็นรูปคลื่น 12 พัลส์

## 2.4 การวางเรียงแปลงผันแรงดันไฟกระแสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์

### วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM

วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM จะใช้ไอจีบีที 6 ตัว สามารถสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบ 6 พัลส์ และควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามต้องการโดยการป้อนสัญญาณ PWM เข้าไปยังขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - (V_{dc} s_a + V_{NO}) \tag{7}$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - (V_{dc} s_b + V_{NO}) \tag{8}$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - (V_{dc} s_c + V_{NO}) \tag{9}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c - \frac{V_{dc}}{R_L} \tag{10}$$

$$V_{NO} = -\frac{V_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \tag{11}$$

เมื่อ  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ) แต่  $S_i = 1$  ( $i = a, b, c$ ) มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ เปิด และถ้า  $S_i = 0$  ( $i = a, b, c$ ) ไม่มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ ปิด

เงื่อนไข :

$$S_i \begin{cases} 1 & \text{แขนด้านบน จะ เปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ ปิด} \\ 0 & \text{แขนด้านบน จะ ปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ เปิด} \end{cases}$$

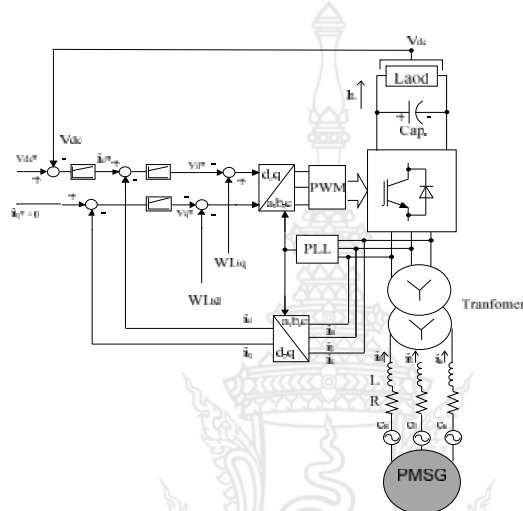
เพื่อง่ายต่อการออกแบบสัญญาณควบคุมจึงต้องมีการแปลงระบบ 3 เฟสไปสู่ระบบ 2 เฟส โดยแปลงจาก abc ไปสู่ dq เพื่อสร้างสัญญาณทริกขาเกตของ IGBT โดยนำสมการที่ (12)-(15) มาเขียนเป็น ระบบ dq ดังนี้

$$U_{sd} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \dot{S} Li_q + V_d \tag{12}$$

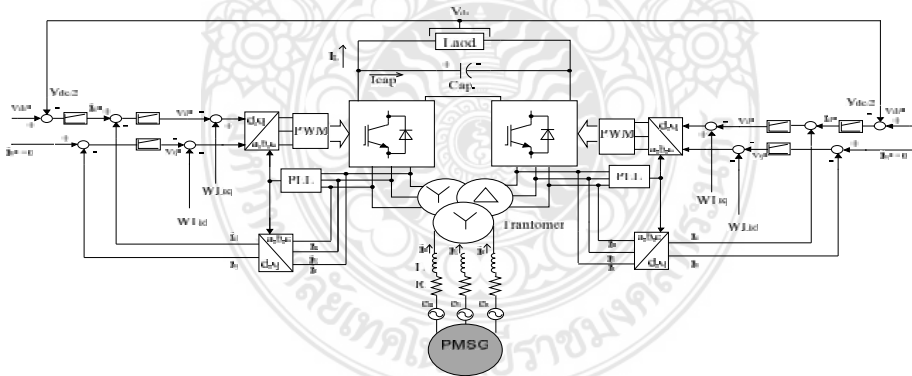
$$U_{sq} = L \frac{di_q}{dt} + R i_q + \dot{S} L i_d + V_q \quad (13)$$

**2.5 การควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM 6 พัลส์**

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ ใช้วิธีการควบคุม โดยการควบคุมแรงดันดีซีบัสให้คงที่ที่ 700 V ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ ควบคุมด้วยกระแส id ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กมาต่อกับชุดหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI



รูปที่ 9 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI

**2.6 การควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM 12 พัลส์**

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์นั้น ใช้วิธีการควบคุม เป็น 2 ชุดๆละ 6 พัลส์ โดยการควบคุมแรงดันดีซีบัสให้คงที่ ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ ควบคุมด้วยกระแส id ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กมาต่อกับชุดหม้อแปลง แยกออกไปยังชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุด มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้รูปคลื่น เป็นแบบ 12 พัลส์ ทางเอาท์พุทจะต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 9

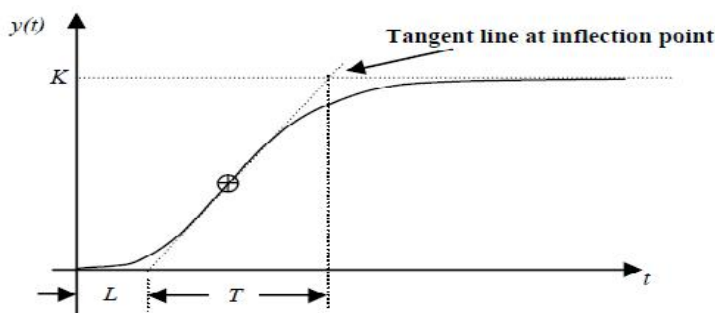
**เทคนิคการหาพารามิเตอร์ควบคุมแบบ Ziegler – Nicole**

เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PI โดยใช้แบบ Ziegler – Nicole ภายใต้กระบวนการของระบบแบบลูปปิด (Closed loop) วิธีนี้สามารถหาค่า  $k_p$  และ  $k_i$  โดยการปรับค่า  $L$  และ  $T$  จากกราฟการตอบสนองของวงจรที่สร้างขึ้นหรือต้องการควบคุม (รูปที่ 10) เพื่อนำมาแทนค่าในตารางที่ 1

- เมื่อ  $K_p$  = Proportional Gain
- $K_i$  = Integral Gain
- $K_p$  = Derivative Gain
- $T_i$  = Reset time
- $T_d$  = Rate time or derivative time

ตารางที่ 1 การปรับค่าโดยวิธี Nicole – Ziegler

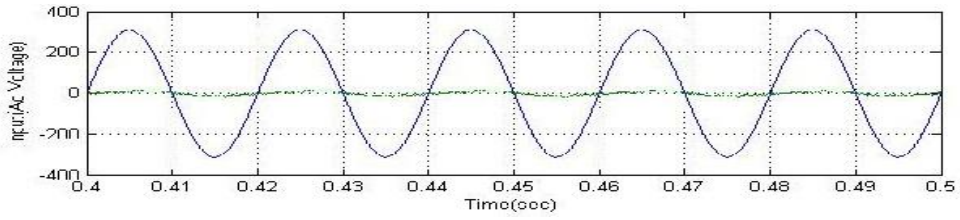
| PID TYPE | $K_p$             | $T_i = K_p / K_i$ | $T_d = K_d / K_p$ |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P        | $\frac{T}{L}$     | $\infty$          | 0                 |
| PI       | $0.9 \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0.3}$   | 0                 |
| PID      | $1.2 \frac{T}{L}$ | $2L$              | $0.5L$            |



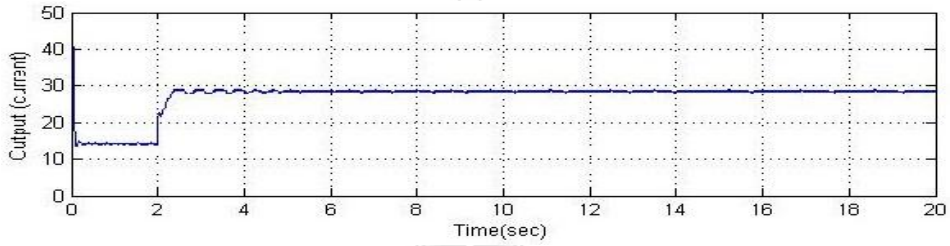
รูปที่ 10 ผลการตอบสนองแบบ Nicole – Ziegler

**3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล**

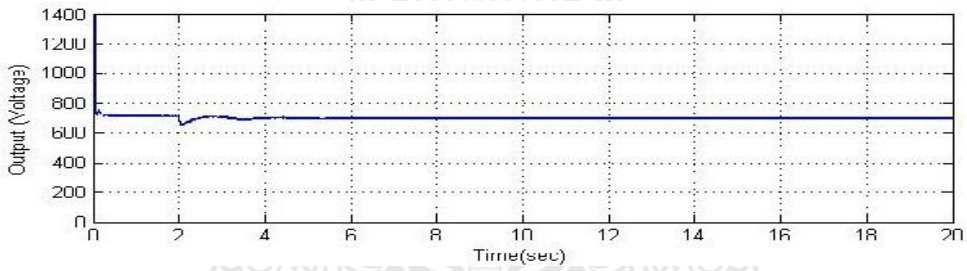
การจำลองการควบคุมการเชื่อมต่อกับ PMSG ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อต่อเข้าชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้ หม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 20 kVA ค่าความต้านทานด้านเข้าเท่ากับ  $0.15 \Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำด้านเข้าเท่ากับ 3 mH โดยมีความถี่การสวิตซ์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ PWM มีค่าเท่ากับ 2 kHz และต้องการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านออกเท่ากับ 7000 V จ่ายให้กับโหลดขนาด 20 kW หรือระบบเชื่อมต่อกิริติ สามารถแสดงผลการจำลองการทำงานได้ ดังรูปที่ 11 – 20



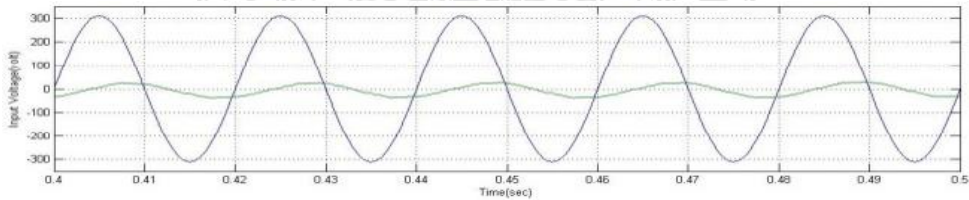
รูปที่ 11 แรงดันและกระแสด้านเข้าของเฟส A (6 พัลส์)



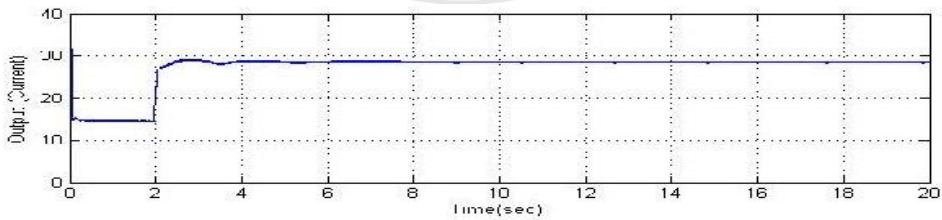
รูปที่ 12 กระแสด้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (6 พัลส์)



รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าด้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (6 พัลส์)

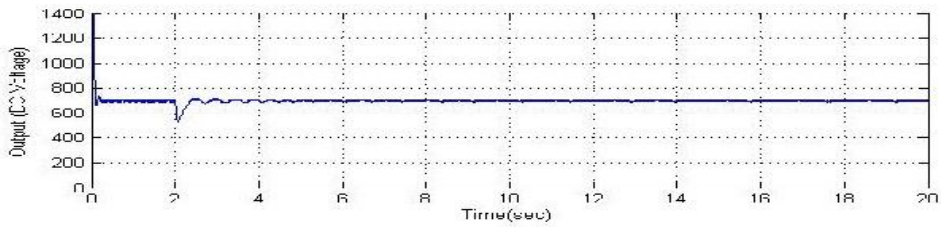


รูปที่ 14 แรงดันและกระแสด้านเข้าของเฟส A (12 พัลส์)

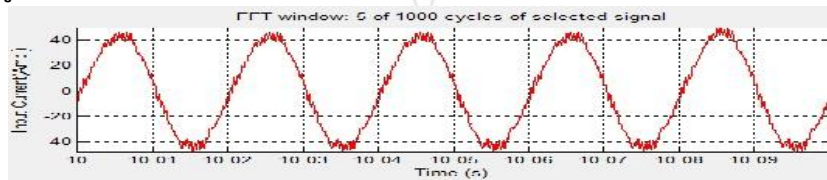


รูปที่ 15 กระแสด้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (12 พัลส์)

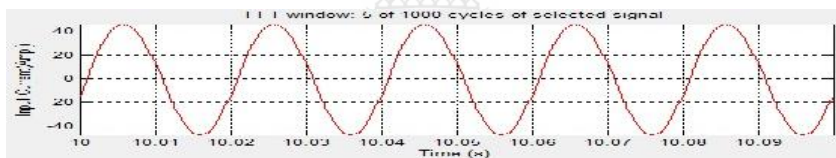




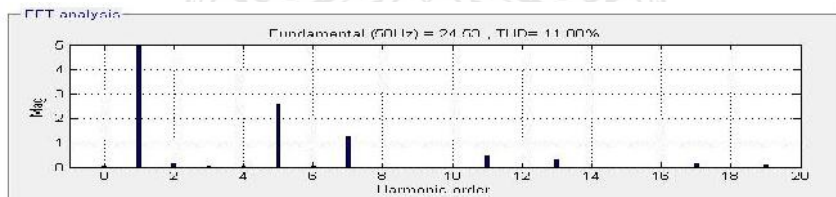
รูปที่ 16 แรงดันไฟฟ้าด้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (12 พัลส์)



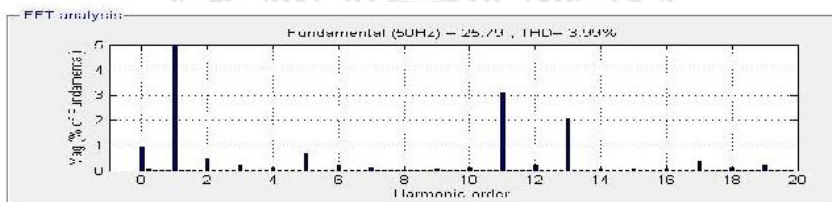
รูปที่ 17 สัญญาณความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าด้านเข้าจากฮาร์มอนิกส์(6 พัลส์)



รูปที่ 18 สัญญาณความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าด้านเข้าจากฮาร์มอนิกส์ (12 พัลส์)



รูปที่ 19 กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรเรียงกระแส PWM แบบ 6 พัลส์



รูปที่ 20 กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรเรียงกระแส PWM แบบ 12 พัลส์

#### 4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยการควบคุมแบบ PI ใช้เทคนิคการหาพารามิเตอร์ควบคุมแบบ Nicole –Ziegler สามารถควบคุมแรงดันไฟดีซีบัสให้คงที่ๆ 700 V แม้ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่วินาทีที่ 2 ก็ตาม และโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) ร้อยละ 3.99 ยังมีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์น้อยกว่า แบบ 6 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) ร้อยละ 11.88 เพราะฉะนั้นโครงสร้างวงจรที่เป็นแบบ 12 พัลส์ เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงเพื่อลดความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อันเกิดจากปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าได้ในอนาคต

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- สนธยา มั่นหมาย ,กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์.แบบจำลองการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวคเตอร์.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.64-67,2555
- ชาคริต วินิจธรรม กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และ ณัฐภัทร พันธุ์คง.การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟกระแสสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรม ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.125-128,2556
- Karl M. Hink.Harmonic mitigation of 12-pulse drives with unbalanced input line voltage. MTE Corporation.
- Liqiu Han, Jiabin Wang and David Howe.State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers. Electrical Engineering, University of Sheffield.
- Shutuan Zhang, Kai Zhang, Zhongshan Jiang and Fang Lu. Modeling and Simulation of Three-phase Rectifier Based on SVPWM. IEE Trans. Ind. Electron,pp.318-321 ,2010.
- Brian R Copeland. The design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning.March 2008.