

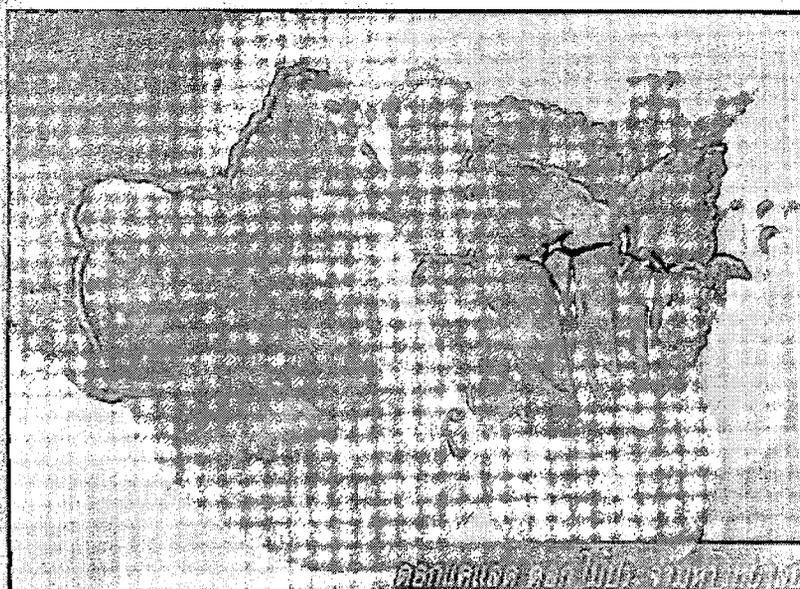


ภาคผนวก
งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



Electrical Engineering Network 2012

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)

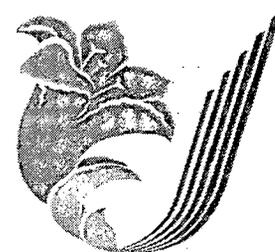
Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



EENET 2012

GRAND PARADISE HOTEL

Nong Khai, THAILAND

April 3-5, 2012



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

สารบัญ

บทความวิจัย

PE01	การเปรียบเทียบวิธีควบคุมแรงดันไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแรงดัน	1
PE02	อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย dsPIC30F4011	5
PE03	เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าระยะไกลผ่านทางสายสื่อสารแบบไร้สาย	9
PE04	ชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในการประยุกต์ใช้กับพลังงานลม	13
PE05	การประยุกต์ใช้ dsPIC30F4011 เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแบบต่างๆ สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง	17
PE06	บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ	21
PE07	ระบบควบคุมสำหรับการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า	25
PE08	การพัฒนาเรือดน้ำไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซล	29
PE09	การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	33
PE10	การตรวจจับแบบความเวลาจริงเพื่อประเมินความรุนแรงของกระแสฮาร์มอนิกกรณีศึกษาในอาคารประเภทศูนย์การค้า	40
PE11	ชุดควบคุมแหล่งจ่ายและรักษาระดับแรงดันเพื่อขับโหลด แอล อี ดี	44
PE12	อุปกรณ์รายงานสถานะตัวแปรโปรเซส	48
PE13	การลดขนาด ตัวกรอง อีเอ็มไอ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงโดยใช้วงจรเรียงกระแสโซแนนซ์คลาสดีอีแบบสมมาตร	52
PE14	การประมาณค่าความเร็วโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก	56
PE15	การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน	60



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

**การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ
สำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน**

Simulation of Three-Level Power Back-to-Back Circuit for Renewable Energy Sources

นาวิน บุคคานนท์ อนุภักดิ์ พันธุ์คง และกฤษณ์ชานนท์ ภูมิภักดิ์พิชญ์

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร: 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งใช้หลักการควบคุมแบบ SVPWM เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเพื่อให้ได้รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสม จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันนี้สามารถแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถนำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดได้

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ, การมอดูเลตสัญญาณพัลส์บวกลวด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents the method of 3-Level Back-to-Back Converter for renewable energy source test by using MATLAB/SIMULINK program. The voltage and current of the converter can be properly controlled by SVPWM controller to control Switching devices. The simulation results shown that the converters can convert the voltage and current from the AC to DC and from the DC to AC for more performance and linking to Grid.

Keywords: Three-Level Back-to-Back Converter, Space Vector Pulse Width Modulation

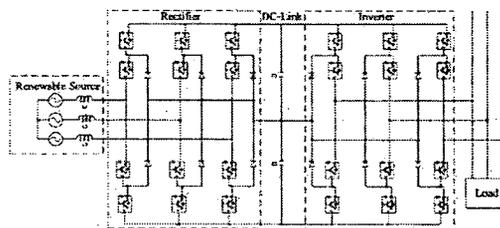
1. บทนำ

ปัจจุบันแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ถูกนำมาใช้ในการช่วยจ่ายโหลดมากขึ้น เช่น กังหันลม (Wind turbine) เป็นต้น โดยเชื่อมเข้ากับระบบกริด แต่เนื่องจากความถี่ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในกังหันลมมีขนาดต่ำมากและขนาดแรงดันจำเป็นต้องถูกควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับระบบ ซึ่งแรงดันและความถี่ที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันและความถี่ให้เท่ากับระบบกริดเสียก่อน งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการจำลองวงจรแปลงผัน

ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับและสองระดับ[1], [3] และการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ[4], [5] โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณพัลส์บวกลวด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ซึ่งผลการจำลองที่ได้มีขึ้นก่อนข้างแตกต่างกัน และวิธีที่ใช้ในการจำลองการทำงานก็ต่างกันเช่นเดียวกัน

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ[2] โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและนำไปพัฒนาต่อเพื่อเป็นการรองรับการใช้พลังงานทดแทนในอนาคต

2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ [2]



รูปที่ 1 โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่นำเสนอ

โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน (Renewable source) และ โหลด (Load) และอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดๆ ละ 12 ตัว ซึ่งแต่ละชุดจะแบ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) นอกจากนี้ก็มีตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 ซึ่งอยู่บริเวณที่เรียกว่า DC-Link ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

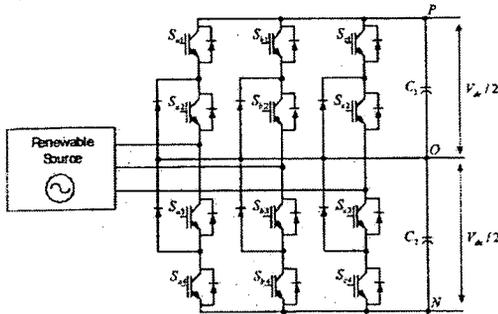
3. แบบจำลองการทำงาน

3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) [1]



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับจะมีตัวเก็บประจุที่ DC-Link คือ C_1 , C_2 และกระแสที่ไหลคือ i_{L1} , i_{L2} ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับจะมีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นซายน์ โดยใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์สถานะในแต่ละกิ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งจะได้รับแรงดันที่สามกิ่งเท่ากับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าจากกริดจะไหลไปทางด้านโหลด ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับจากทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่กริดเพื่อช่วยให้สถานะการทำงานเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

สมการ (1) และ (2) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการหมุนของแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) ตามโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) = v_{dc} i_{dc} \quad (2)$$

เมื่อ e_d, e_q คือเวกเตอร์ของแรงดันกริด และ e_a, e_b, e_c คือส่วนประกอบเวกเตอร์ d-q ของ E_{dq} หลังจากมีการแปลงแกน V_d, V_q จะได้ส่วนประกอบเวกเตอร์แรงดันของ V_{dq} ที่ด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แกนหมุน d-q ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะแสดงส่วนประกอบกระแสของแกน d,q (i_d และ i_q) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันนั้นหมายความว่า จะเป็นการไม่สะดวกที่จะออกแบบตัวควบคุมกระแสซึ่งจะทำให้เกิดปัญหา ดังนั้นบทความนี้จึงแนะนำให้ i_d และ i_q ใช้การมอดูเลชันไปข้างหน้าด้วยตัวควบคุมที่แยกออกจากตัวควบคุมกระแสในแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) คือ

$$\begin{cases} \dot{v}_d^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ \dot{v}_q^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ K_{ip}, K_{il} คือสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์และจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญในรูป กระแส i_d^*, i_q^* เป็นพฤติกรรมของกระแส i_d, i_q จะใช้สมการ (3) และ (1)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \\ K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

วงจรทั้งหมดจะประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, อุปกรณ์กระแส d-q และส่วนของการมอดูเลตสัญญาณที่ระดับลิแวนต์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ซึ่งจะครอบคลุมความต้องการของเสถียรภาพการทำงานทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวประกอบกำลังของกริด นอกจากนี้ระบบจะเพิ่มสถานะกระแสไหลย้อนกลับและค่าชดเชยการไหลไปข้างหน้าของแรงดันที่คิดเห็นที่กริด ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมแรงดันได้สมบูรณ์ เมื่อแรงดันในสัญญาณสวิตช์ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยการมอดูเลตสัญญาณที่ระดับลิแวนต์ที่เปลี่ยนให้กับวงจรหลักจะช่วยเสริมการควบคุมแรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ต้องการ

3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) [5]

การคล้ายกันของนิยามฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับก็เช่นเช่นนั้น ในการวิเคราะห์จะง่ายขึ้นเมื่อทำให้รูปวงรีไฟฟ้าทั้งหมดเป็นสวิตช์ในอุดมคติ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่สามเฟสเท่ากันที่ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ฟังก์ชันสวิตช์ซึ่งสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับคือ

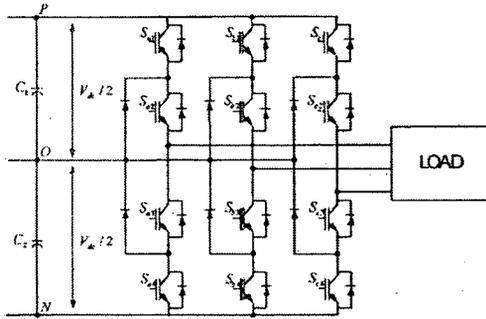
$$s_i = \begin{cases} 1 & (u_i = \frac{1}{2} E_d) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & (u_i = -\frac{1}{2} E_d) \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (5)$$

นอกจากนี้แต่ละกิ่งสามารถเปลี่ยนสถานะโดยใช้สวิตช์ เพราะฉะนั้นแบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับ(รวมทั้งโหลด) ดังแสดงในรูปที่ 4 และ

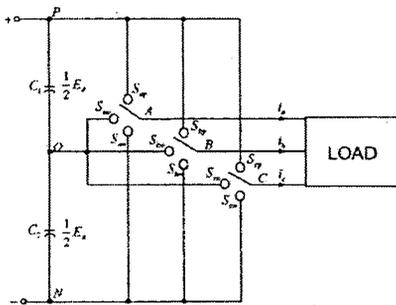


การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ฟังก์ชันสวิตช์ S_i จะแบ่งออกเป็น S_{ip}, S_{io} และ S_{in} เมื่อเปิดแต่ละอินพุตของอินเวอร์เตอร์เท่ากับหนึ่ง และเมื่อปิดมันก็จะเป็นศูนย์เพราะว่าสองสวิตช์ที่แต่ละเฟส ไม่สามารถเปิดและปิดที่เวลาเดียวกันได้ ดังนั้น S_{ip}, S_{io}, S_{in} จะได้ว่า $S_{ip} + S_{io} + S_{in} = 0$



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 4 จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสามเฟสคือ

$$\begin{cases} u_{AN'} = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + E_a \\ u_{BN'} = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + E_b \\ u_{CN'} = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + E_c \end{cases} \quad (6)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่ไหลและแรงดันของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านขอกจะสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

ดังนั้นนำ (4) รวมใน (3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถจัดรูปแบบใหม่ได้คือ

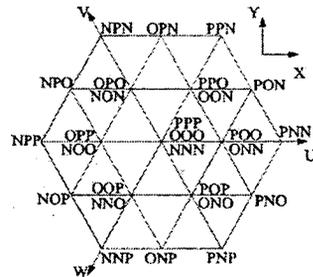
$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_d}{6L} \times (3S_a - S^*) - \frac{E_a}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_b - S^*) - \frac{E_b}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_c - S^*) - \frac{E_c}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ $S^* = S_a + S_b + S_c$

3.3 การมอดูเลตสัญญาณที่ดับบลิเอ็มด้วยเทคนิคสลับ

เวกเตอร์ (SVPWM) [1], [5]

แต่ละเฟสของวงจรสามระดับมีสถานะการสวิตช์อยู่สามสถานะ ดังนั้นวงจรแบบสามระดับจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ (3³) โดยแสดงในแต่ละสถานะการสวิตช์บนรูปหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5 และที่นำมาเพิ่มเติม [1], [5]



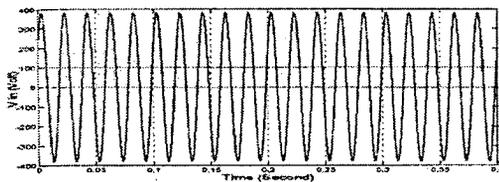
รูปที่ 5 สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ [1], [5]

4. ผลการจำลอง

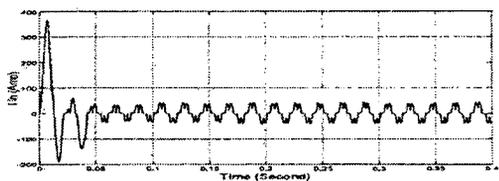
การจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ตัวเก็บประจุที่ DC-Link ตัวละ 4,700 μ F ความถี่สวิตช์ 20 kHz โหลดขนาด 1 kW (100%) และ โหลดขนาด 1/2 kW (50%) โดยจะทำการเปรียบเทียบแรงดันที่มีค่าประมาณ 380 V ความถี่ 50 Hz ดังรูปที่ 6 และ 7



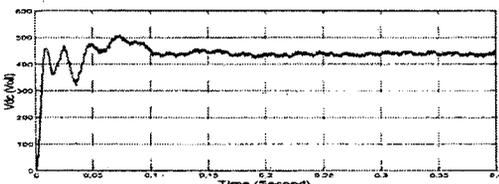
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555



รูปที่ 6 แรงดันของเฟส AB ทางด้านขาเข้า

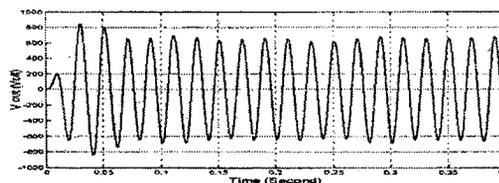


รูปที่ 7 กระแสของเฟส A ทางด้านขาเข้า

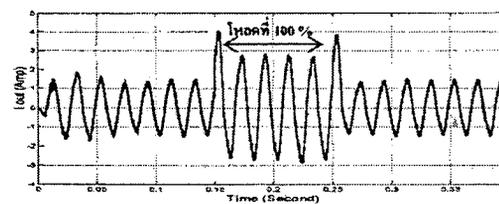


รูปที่ 8 แรงดันที่ DC-Link

ในการจำลองจะใช้ระยะเวลา 0.4 s จะได้แรงดันที่ DC-Link ประมาณ 450 V ดังรูปที่ 8 ในส่วนของแรงดันด้านขาออกที่เฟส AB นี้ แรงดันประมาณ 650 V และกระแสด้านขาออกที่โหลด 50% ประมาณ 1.5 A และที่โหลด 100% ประมาณ 2.7 A ดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 แรงดันของเฟส AB ทางด้านขาออก



รูปที่ 10 กระแสของเฟส A ทางด้านขาออก

5. สรุป

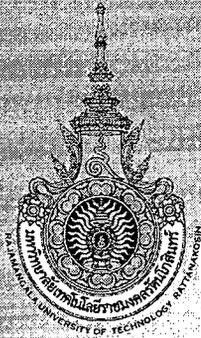
บทความนี้ได้นำเสนอการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ โดยแบ่งการทำงานเป็นสองส่วนหลักๆคือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้การบอดูแลคสัญญาณที่ดับบลิทด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์สร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิทซ์ ซึ่งผลที่ได้คือวงจรแปลงผันไฟฟ้านี้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ถึงแม้จะมีการเพิ่มและลดโหลดแค่ระบบควบคุมก็สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยรูปคลื่นของแรงดันเพิ่มขึ้นและรูปคลื่นของกระแสก็มีสัญญาณรบกวนน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปคลื่นทางด้านขาเข้า ดังนั้นการจำลองวงจรแปลงผันนี้ได้ผลค่อนข้างดีซึ่งสามารถนำไปพัฒนาออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้าสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wen-xiang, C. Da-peng and Q. Jin-yong, "Study on the Control Strategy of Three-level PWM Rectifier Based on SVPWM", Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'09, IEEE 6th International, pp.1622-1625, 17-20 May 2009.
- [2] Z. Yingchao, Z. Zhengning, L. Ting, Z. Yngchang and Y. Liqiang, "A Novel Control Scheme for Three-Level NPC Back-to-Back Converter", Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '08, IEEE, pp.1-5, 3-5 Sep. 2008.
- [3] W. Xu, H. Kaizheng, Y. Shijie and X. Bin, "Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on the Space Vector Modulation", Control and Decision Conference, CCDC, Chinese, pp.1881-1884, 2-4 July 2008.
- [4] N. Meejit, A. Jaruseni, "Design and Implementation of 1 kW Diode-Clamped Three-level Inverter" Thesis, Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2010.
- [5] Y. Zhezhi, Y. Lingzhi, P. Harnei, F. Xi and D. Dong, "Study of Simplified SVPWM Algorithm Based on Three-Level Inverter", Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, pp.876-881, 17-20 May 2009.



Program and Abstract Proceedings
The 3rd International Conference
on Sustainable Energy and Green Architecture
Chaophya Park Hotel, Bangkok, Thailand
March 14-16, 2012



SEGA-03
Sustainable Energy and Green Architecture

**Conference Theme: Climate Change Mitigation
through Sustainable Built Environment Development**



RCSEE
ENERGY & ENVIRONMENT

Organized by:

Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment
Rajamangala University of Technology Rattanakosin



Co-Hosted by:

Faculty of Architecture Kasetsart University



Session 8			
Track/Room	Ratchada 1	Ratchada 2	Ratchada 3
Chair	P. Sohsalam	J. Khedari	S. Teekasap
Cochair	V. Boonyayothin	T. Tondee	P. Teekasap
11.40-12.00	BT-33 "Development of Dynamic Voltage Restorer by Using the Topology of Diode-Clamped Three-Level Converter" by Chankhamrian et al.	RE-28 "Simulation of Three-Level Power Back-to-Back Circuit for Renewable Energy Sources" by Yuktanon et al.	PE-20 "Thailand Climate Data Analysis towards the Development of a New Energy Saving Approach for Air-conditioners " by Suparos et al.
12.00-13.00	Lunch		
Session 9			
Track/Room	Ratchada 1	Ratchada 2	Ratchada 3
Chair	P. Chantawong	P. Sohsalam	J. Waewsak
Cochair	V. Boonyayothin	T. Tondee	W. Puangsombut
13.00-13.20	BT-34 "Experimental Investigation of Energy Performance of Split type Air Conditioning under various indoor setpoint temperatures and different air flowrates through cooling coil" by Suparos et al.	TM-29 "The Design of Fin Heat Exchanger for Thermoelectric Power Generation from Waste Heat Recovery from the Manufacturing" by Puffarut et al.	RE-24 "Analysis Overvoltage Problem at Terminal of Induction Motors" by Yoosanon et al.
13.20-13.40	BT-35 "An Experimental Study of Energy Performance of Split Type Air-Conditioner at Different Apparatus Dew Point Temperatures" by Suparos et al.	TM-30 "Development of a Modular metallic Thermoelectric Roof Power Generator" by Labaiyusoh et al.	RE-25 "Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) by Using Vector Control" by Manmai et al.
13.40-14.00	RE-20 "Optimal Placement of Large-Scale PV Power Generation Systems in Radial Distribution Systems for Loss Reduction" by Pattayanun et al.	TM-31 " $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_{3.0}$ Thin Films by CO_2 Laser ablation" by Kosalathip et al.	PE-16 "Designing of 10 kW Wind Machine for Low Wind Speed Region Using Computational Fluid Dynamics (CFD)" by Roynarin et al.
14.00-14.20	RE-21 "Electricity by Waste Heat Recovery from Household Equipments" by Kumpeerapun et al.	TM-32 "In situ Classification of Agglomerated Thermoelectric Nanopowder" by Muangma et al.	RE-22 "Load-Frequency Control of Interconnected Power System by using Fuzzy Logic Controller" by Yukhalang et al.
14.20-14.40	Coffee Break		



SEGA-03
Sustainable Energy and Green Architecture

3rd International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture
14-16 March, 2012, Bangkok

RE28

Simulation of Three-Level Power Back-To-Back Circuit For Renewable Energy Sources

Nawin Yuktanon, Nathabhat Phankong and Krischonme Bhumkittipich

Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
Tel: 0-2549-3571 Fax: 0-2549-3422 Email: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper presents the method of 3-Level Back-to-Back Converter for renewable energy source test by using MATLAB/SIMULINK program. The voltage and current of the converter can be properly controlled by Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) to control the switching devices to the AC and DC waveform. The simulation results shown that the converters can convert the voltage and current from the AC to DC and from the DC to AC for more performance and linking to grid. In addition, the current waveform of the output signal will have signal distortion less than current input waveform and waveform at the output voltage is increased from the input as well.

Keywords: Three-Level Back-to-Back Converter, Space Vector Pulse Width Modulation





SIMULATION OF THREE-LEVEL POWER BACK-TO-BACK CIRCUIT FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

Nawin Yuktanon, Nathabhat Phankong, and Krischonme Bhumkittipich

Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand 12110
Tel: 0-2549-3571 Fax: 0-2549-3422 Email: krischonme.b@en.mutt.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the method of three-level back-to-back converter for renewable energy source test by using MATLAB/SIMULINK program. The voltage and current of the converter can be properly controlled by space vector pulse width modulation (SVPWM) to control the switching devices to the ac and dc waveform. The simulation results shown that the converters can convert the voltage and current from the ac to dc and from the dc to ac for more performance and linking to grid. In addition, the current waveform of the output signal will have signal distortion less than current input waveform and waveform at the output voltage is increased from the input as well.

INTRODUCTION

Nowadays, renewable energy sources can be increasingly utilized to supply them to the load, such as wind turbines, etc. by connecting to the grid system. However, the frequency of generator in wind turbine is very low, and the voltage must be controlled to a value closing to the grid system. The voltage and frequency, which are generated by the generator, cannot be connected to the grid system directly. Therefore, it is necessary to vary the voltage and frequency to the grid firstly. Recent studies have presented the simulation of three-level inverter using the space vector pulse width modulation method. The simulation results demonstrate the proposed three-level PWM rectifier that provides the excellent performance both in steady-state and dynamic load variations. (S. Wen-xiang et al., 2009).

Further research presented the simulation of two-level inverter, which is compared sinusoidal pulse width modulation technique method and space vector pulse width modulation technique method. The simulation results show the control system with fast response and the stable dc voltage. Other, the voltage level is more than the sinusoidal pulse width modulation technique method. (W. Xu et al., 2008). Moreover, this research presented the comparison between the three-level inverter and two-level inverter simulations with using sinusoidal pulse width modulation technique method. A simulation result of three-level inverter has noise less than two-

level inverter. (N. Meejit et al., 2010). And the later research presented the simulation of three-level inverter using the space vector pulse width modulation method. The simulation results show feasibility of this strategy and excellent performance of this system. (Y. Zhezhi et al., 2009). From the above researches, the simulation of three-level back-to-back converter by using the space vector pulse width modulation shows that the voltage and current waveforms have an increasing value and a low noise value, respectively.

Therefore, this paper presents the mathematical model of three-level back-to-back converter with the space vector pulse width modulation control algorithm by using MATLAB/SIMULINK program to monitor performance and to develop for supporting the renewable energy utilization in the future.

BACK-TO-BACK CONVERTER

(Z. Yingchao et al., 2008)

The main circuit of the back-to-back converter is composed of renewable source, load, and switching devices. The switching devices or IGBT are divided into two sets that are equal to 24 pieces. The 12 switching devices will be operated as a rectifier, and the 12 switching devices will be performed as an inverter. It also has C_1 and C_2 , which is called DC-link, between the rectifier and the inverter.

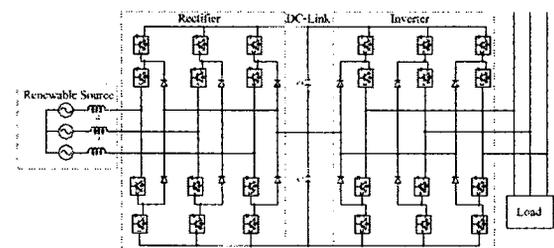


Figure 1 Main circuit of three-level back-to-back converter.

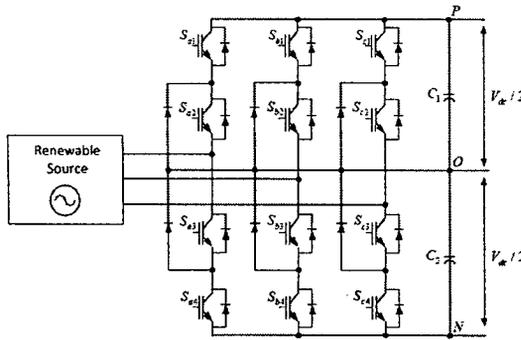


Figure 2 Main circuit of three-level rectifier.

SIMULATION OF THREE-LEVEL RECTIFIER (S. Wen-xiang et al., 2009)

The three-level rectifier circuit, which is shown in Fig. 2, combines with 12 IGBTs, 6 diodes, and 2 capacitors C_1 and C_2 .

The nature of the three phase three-level PWM rectifier is the pure sinusoidal waveforms that can be achieved in grid currents with a unity power factor by optimizing the IGBTs switching status in each arm. Then the ending voltage of the three arms is equal to the three phase AC voltage sources. The power flows from the grid to DC-side load in converse condition while the power feedback from the DC-side to the grid in regeneration status working as a three phase PWM inverter.

Equations (1) and (2) are the mathematical model established in synchronous rotating reference frame (d-q frame) based on the topology of three-level PWM rectifier:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) = v_{dc} i_{dc} \quad (2)$$

Where e_d and e_q denote the vector of grid voltage e_a , e_b and e_c in the d-q component vector of E_{dq} after rotation transform, V_d and V_q are the voltage vector component of V_{dq} in AC side of the rectifier.

The mathematical model in d-q frame of the PWM rectifier shows the simultaneous current component of d, q axis (i_d and i_q). Therefore, to figure out the problem for designing the current controller. This paper introduces the i_d and i_q feed-forward decoupling controller. The current-loop of the i_d and i_q is PI controller. The voltage instruction of the three phases VSR current control in synchronous rotating reference frame (d-q frame) is:

$$\begin{cases} v_d^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{if}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ v_q^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{if}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

Where, K_{ip} and K_{if} are the proportionality coefficient and the integral coefficient in current loop, respectively. i_d^* and i_q^* are the current instruction of i_d and i_q , respectively. The topology of three-level PWM rectifier with the proportional and integral coefficients is expressed in Equation (4) by putting Equation (3) into Equation (1):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{if}}{s}\right)\right]/L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{if}}{s}\right)\right]/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} K_{ip} + \frac{K_{if}}{s} \\ K_{ip} + \frac{K_{if}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

The whole circuit is composed of the DC voltage control loop, d-q current control loop, and the SVPWM part to fulfil the demand of the DC side voltage steady working and a unity power factor of the grid. Figure 2 shows the controlling system structure. The outer-loop is the current feedback controller, voltage PI controller feeds the i_d^* , the output of the current PI in inner-loop is the current feedback and the current controller. Moreover, the system has the current status feedback and the feed forward compensation of the distortion grid voltage to accomplish the complete control voltage. The voltage changes into the switching signal by PWM modulation to feed the main circuit to achieve the AC side control voltage.

SIMULATION OF THREE-LEVEL INVERTER (Y. Zhezhi et al., 2009)

Similar to the definition of two-level inverter switching function, three-level inverter is as follows. In order to facilitate the analysis, the power devices are assumed as ideal switches; it is the symmetrical three phase for AC inverter side. The switching function for the three-level inverter is:

$$s_i = \begin{cases} 1 & \left(u_i = \frac{1}{2} E_d\right) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & \left(u_i = -\frac{1}{2} E_d\right) \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (5)$$

In other words, each bridge arm can be replaced by a switch, accordingly, a simplified model of main circuit of two-level inverter can be found (including load), as shown in Fig. 4. And switching function S_i



is decomposed as S_{ip} , S_{io} and S_{in} single switch. When the switching device is turn-on, it is equal to 1. When the switching device is turn-off, it is equal to 0. Because two switches in the same branch or arm cannot turn-on or turn-off at the same time, so that S_{ip} , S_{io} and S_{in} yield as $S_{ip} + S_{io} + S_{in} = 0$

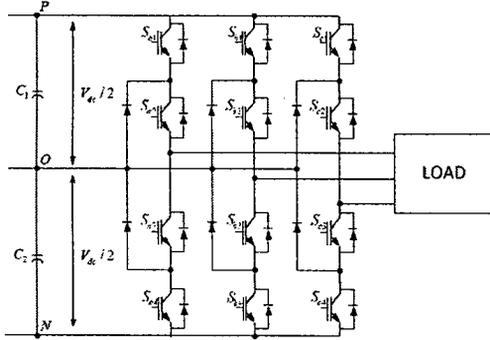


Figure 3 Main circuit of three-level inverter.

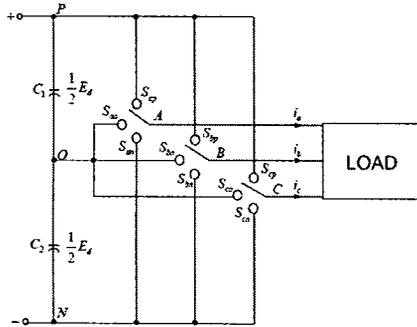


Figure 4 Simplified mode of three-level inverter

As referring Fig. 4, the differential equations of three-phase circuit are expressed in Equation (6):

$$\begin{cases} u_{AN'} = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + E_a \\ u_{BN'} = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + E_b \\ u_{CN'} = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + E_c \end{cases} \quad (6)$$

It can be formatted as the matrix form in Equation (7):

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Because the relationship between load-phase voltage and inverter output voltage can be expressed as follows:

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

So, Put (8) into (7), the main circuit mathematical model of the three-level inverter can be reformatted in Equation (9):

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_d}{6L} \times (3S_a - S^*) - \frac{E_c}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_b - S^*) - \frac{E_b}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_c - S^*) - \frac{E_a}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM)

(S. Wen-xiang et al., 2009, Y. Zhezhi et al., 2009 and C. Piset et al., 2008)

Each phase of the circuit of the three levels has three states. Then, the three-level voltage space vector can be generated for all 27 states (3^3). The status of the switches can be shown in the hexagon as Fig. 5.

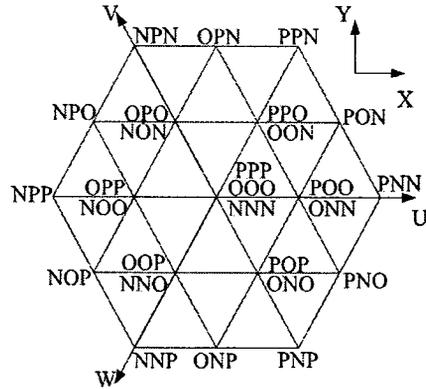


Figure 5 Voltage space vector diagram of three-level inverter.

Table 1 Group of voltage vector.

Voltage Vector	Symbols
ZVV	(PPP), (OOO), (NNN)
MVV	(PON), (ONP), (NPO) (NOP), (ONP), (PNO)
LVV	(PNN), (PPN), (NPN) (NPP), (NNP), (PNP)
USVV	(POO), (PPO), (OPO) (OPP), (OOP), (POP)
LSVV	(ONN), (OON), (NON) (NOO), (NNO), (ONO)

In Fig. 5, the vector can be divided into five groups that are summarized in Tab. 1.



- Zero Voltage Vector (ZVV)
- Medium Voltage Vector (MVV)
- Large Voltage Vector (LVV)
- Upper Small Voltage Vector (USVV)
- Lower Small Voltage Vector (LSVV)

SIMULATION RESULTS

The simulation parameters of the MATLAB simulation model are listed in Tab. 2. The simulation results of the input voltage and current are shown in Figs. 6 and 7, respectively.

Table 2 Parameters of three-level AC to AC

Parameter	Values
Voltage Source	380 V_{p-p}
Frequency	50 H_z
Capacitor	4,700 μF
Switching Frequency	20 kH_z
Load 50%, 100%	$\frac{1}{2}$ kW, 1 kW

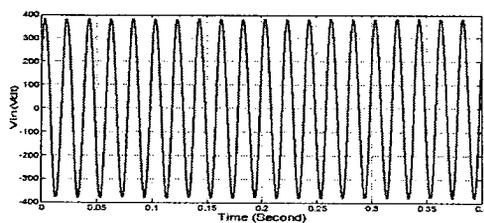


Figure 6 Simulation result for input voltage

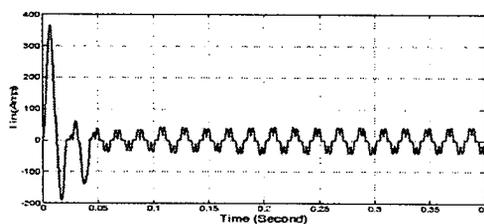


Figure 7 Simulation result for input current.

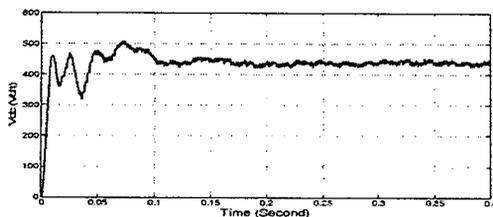


Figure 8 Simulation result for DC-Link voltage

In these results, the time of simulation is equal to 0.4 seconds. The constant DC-link voltage is approximately equal to 450 V as shown in Fig. 8.

The phase AB output voltage is approximately equal to 650 V. The 50% load current is about 1.5 A and 100 % load current is about 2.7 A. The simulation results are shown in Figs. 9 and 10, respectively.

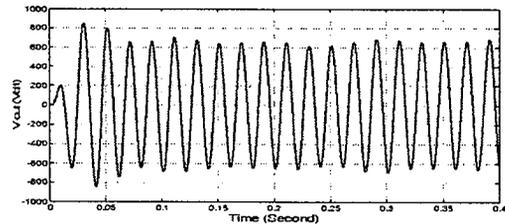


Figure 9 Simulation result for output voltage

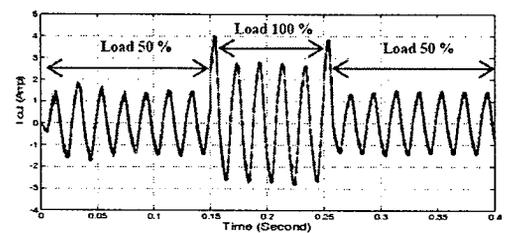


Figure 10 Simulation result for output current

CONCLUSION

This paper presented the simulation of three-level back-to-back converter. The work is divided into two parts as the three-level rectifier and three-level inverter with the space vector pulse width modulation (SVPWM) to generate control signals. The simulation result of the three-level back-to-back converter has higher performance. Although, there are the changing of the load to increase and decrease, the control system can operate normally. In addition, the current waveform of the output signal has the signal distortion less than the current input waveform. The output voltage waveform can be increased and similar to the input voltage waveform. Therefore, the simulation results of three-level back-to-back converter are well. It can be developed to design and create the power converter for renewable energy further.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully thank the Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology, and the financial support from National Research Council of Thailand (NRCT).

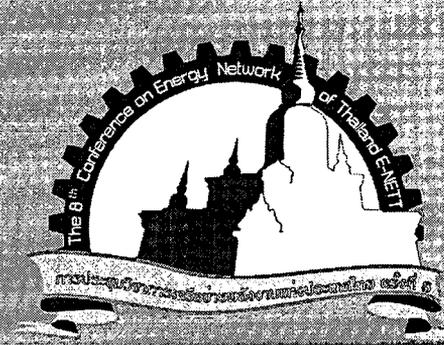
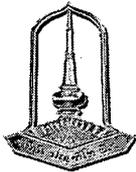


REFERENCES

- S. Wen-xiang, C. Da-peng and Q. Jin-yong, "Study on the Control Strategy of Three-level PWM Rectifier Based on SVPWM". Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'09, IEEE 6th International., pp.1622-1625, 17-20 May 2009.
- Z. Yingchao, Z. Zhengming, L. Ting, Z. Yngchang and Y. Liqiang, "A Novel Control Scheme for Three-Level NPC Back-to-Back Converter", Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '08, IEEE., pp.1-5, 3-5 Sep. 2008.
- W. Xu, H. Kaizheng, Y. Shijie and X. Bin, "Simulation of three - phase voltage source PWM rectifier based on the Space Vector Modulation", Control and Decision Conference, CCDC, Chinese., pp.1881-1884, 2-4 July 2008.
- N. Meejit, A. Jaruensri, "Design and Implementation of 1 kW Diode - Clamped Three-level Inverter" Thesis 2010, Electrical Engineering, Rajamangara University of Technology Thanyaburi, Thailand.
- Y. Zhezhi, Y. Lingzhi, P. Hannei, F. Xi and D. Dong, "Study of Simplified SVPWM Algorithm Based on Three-Level Inverter", Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09, IEEE 6th International, pp.876-881, 17-20.May. 2009.
- C. Piset, P. Wohandech, "Study of Converter Model for Superconducting Magnetic Energy Storage" Thesis 2008, Electrical Engineering, Rajamangara University of Technology Thanyaburi, Thailand.
- Muhammad H. Rashid, "Power Electronics, Circuit, Devices, and Applications", Third Edition, Pearson Education, Inc., pp.271.
- Z. Jinghua, M. Yongqing, L. Zhengxi and L. Kun "Research on Control Method of Three-Level NPC Voltage Source Rectifier". Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE pp.1-6, 3-5 Sept. 2008.
- A. Calle, J. Rocabert, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, S. Alepuz and J. Peracaula "Three-Level Three-Phase Neutral-Point-Clamped Back-to-Back Converter Applied To a Wind Emulator", Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, pp.1-10. 8-10 Sept. 2009.
- P. Mingkhuan, "Minimization of switching losses using SVPWM for Three-Level Inverters" Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
- J. Jaroenkiattraai, "SVPWM-Rectifier with a Small DC-Link Capacitor by using Feedforward Disturbance Rejection Technique" Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
- R. Chaiyot, "Overmodulation Technique for Space Vector Pulsewidth Modulation in a Three-level Inverter" Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.

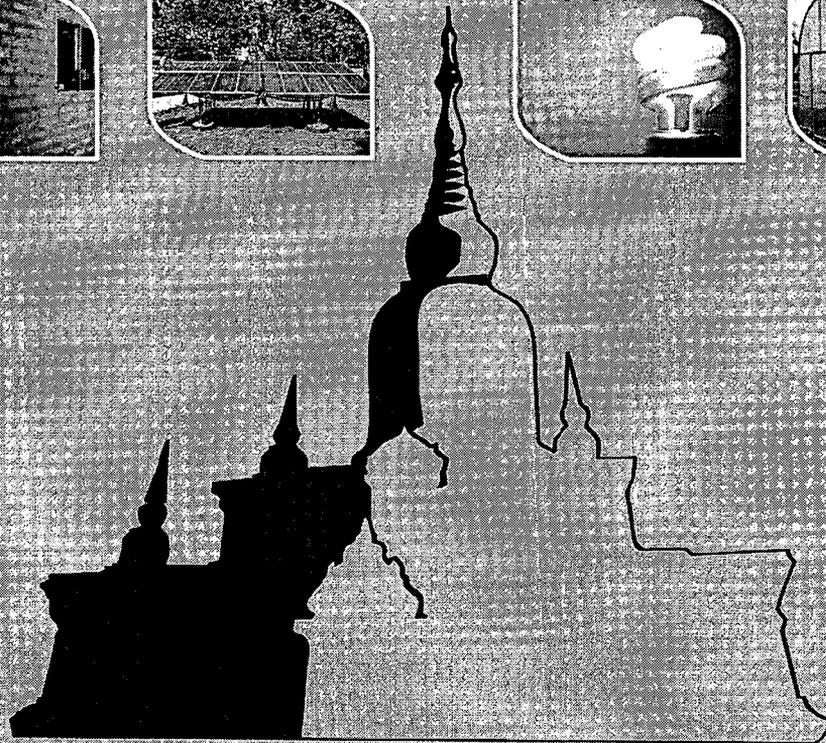
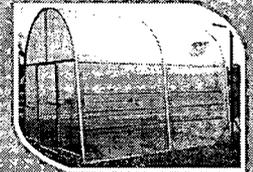
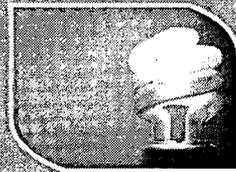
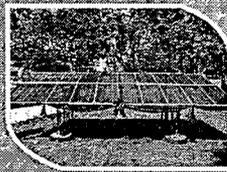
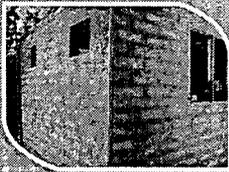


การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8
The 8th Conference on Energy Network of Thailand; E-NETT 8



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน
Green Energy and Innovations for ASEAN's Future



วันที่ 2-4 พฤศจิกายน 2555 โรงแรมธิดาสีลา จังหวัดมหาสารคาม



สารบัญ (ต่อ)

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
RE26	การใช้อากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงแก๊สในการอบแห้งเฟอร์นิเจอร์ไม้เคลือบสีเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส <i>สาคร อินทะชัย, นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ</i>	27
RE27	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink <i>ประสิทธิ์ พรหมมินทร์ และ วันชัย ทพยสังข์</i>	28
RE29	การศึกษาปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำจากวิธีการสกัดสบู่ดำเพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำจากการเก็บเมล็ดและน้ำมัน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ <i>ชานกานต์ อาสาสุจริต, อมรรัตน์ สื่อมโนธรรม, ยุทธนา จานมงคล, ธนิตา สนธิเศวต, นัฐวี ตีรณานนท์ เทพฤทธิ์ กัณหานนท์ และปิยะนันท์ ศรีศิริ</i>	29
RE31	แบบจำลองของสัดส่วนรังสีกระจายต่อรังสีรวมสำหรับประเทศไทย <i>เสริม จันทร์ฉาย, เจษฎา ประทุมสิทธิ์, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, รุ่งรัตน์ วัตดาล</i>	30
RE32	การออกแบบและทดสอบระบบการรวมแสงอาทิตย์โดยแผ่นเรืองแสงเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า <i>ฉัตรชัย คำคำ และ วัฒนา รติสมิทธิ์</i>	31
RE33	การตรวจวัดพลังงานจากรังสีและความสว่างของแสงอาทิตย์ด้วยสถานีวัดอย่างง่าย <i>สมพร หงษ์กิง, นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์, วิชรายุทธ ลำดวน, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์</i>	32
RE34	แบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน <i>นาวิน ยุกตวนนท์, ณัฐภัทร พันธุ์คง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i>	33
RE35	ผลของฝุ่นละอองที่มีต่อคุณสมบัติทางแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ <i>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, วิชิต แสงสุวรรณ, จรัญ ศรีธาราธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</i>	34
RE36	ผลของไฮโดรเจนในชั้นไอที่มีต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน <i>ณัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ, ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, กมลพรรณ ชุมพลรัตน์, วิทวัส มกรพงศ์, วิชิต แสงสุวรรณ, จรัญ ศรีธาราธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</i>	35
RE37	สมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 2.2kWp ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเป็นเวลา 1ปี ติดตั้งที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.) <i>วิทวัส มกรพงศ์, ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, กมลพรรณ ชุมพลรัตน์, ณัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ, วิชิต แสงสุวรรณ, จรัญ ศรีธาราธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</i>	36
RE38	การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งแบบเบส <i>พรสวรรค์ ศรีสุพรรณ, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์</i>	37



RE34 แบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

Modeling of Three-Level Power Back-to-Back Converter for Renewable Energy Sources

นาวิน ยกตานนท์, ณัฐภัทร พันธุ์คง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์*

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
*โทร:0-2549-3571 โทรสาร:0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน สำหรับบทความนี้จะใช้แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนจากกังหันลมและกำหนดให้แรงดันที่กำเนิดจากพลังงานนี้มีค่าสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของวงจรได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK นอกจากนี้แรงดันและกระแสของวงจรแปลงผันนี้ถูกควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสมได้ด้วยหลักการของSVPWM จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสทางด้านขาออกมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่ารูปคลื่นกระแสทางด้านขาเข้า และรูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ารูปคลื่นแรงดันจากทางด้านขาเข้า ดังนั้นวงจรแปลงผันนี้สามารถแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถนำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดได้

คำหลัก: วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents the simulation of three-level power back-to-back converter for renewable energy source. For this paper, it will be focused on wind turbine energy source and determined the voltage from wind turbine energy source being regular value. The operation of the converter can be simulated by using MATLAB/SIMULINK program. Moreover, the voltage and current of the converter can be properly controlled by SVPWM. The simulation results shown that the output current waveform have signal distortion less than the input current waveform, and also the output voltage waveform is more than the input as well. Therefore, this converter can convert the voltage and current from the AC to DC and from the DC to AC for more performance, and it can be connected to the grid.

Keywords: three-level back-to-back converter, space vector pulse width modulation



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

แบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับ
แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

**Modeling of Three-Level Power Back-to-Back Converter for
Renewable Energy Sources**

นาวิน ยุกตานนท์, อนุรักษ์ พันธุ์คง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์*

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
*โทร:0-2549-3571 โทรสาร:0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน สำหรับบทความนี้จะใช้แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนจากกังหันลม และกำหนดให้แรงดันที่กำเนิดจากพลังงานนี้มีค่าสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของวงจรได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK นอกจากนี้แรงดันและกระแสของวงจรแปลงผันนี้ถูกควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสมได้ด้วยหลักการของSVPWM จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสทางด้านขาออกมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่ารูปคลื่นกระแสทางด้านขาเข้า และรูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ารูปคลื่นแรงดันจากทางด้านขาเข้า ดังนั้นวงจรแปลงผันนี้สามารถแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถนำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดได้

คำหลัก: วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ, การมอดูเลตสัญญาณพีดีบีบีเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents the simulation of three-level power back-to-back converter for renewable energy source. For this paper, it will be focused on wind turbine energy source and determined the voltage from wind turbine energy source being regular value. The operation of the converter can be simulated by using MATLAB/SIMULINK program. Moreover, the voltage and current of the converter can be properly controlled by SVPWM. The simulation results shown that the output current waveform have signal distortion less than the input current waveform, and also the output voltage waveform is more than the input as well. Therefore, this converter can convert the voltage and current from the AC to DC and from the DC to AC for more performance, and it can be connected to the grid.

Keywords: Three-Level Back-to-Back Converter, Space Vector Pulse Width Modulation.



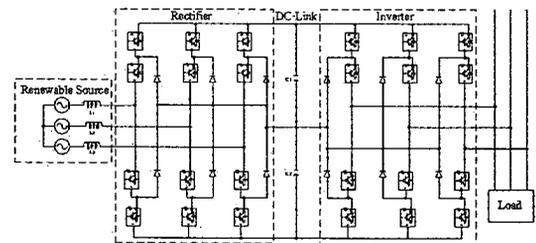
1. บทนำ

ปัจจุบันแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ถูกนำมาใช้ในการช่วยจ่ายโหลดมากขึ้น เช่น กังหันลม (Wind turbine) เป็นต้น โดยเชื่อมเข้ากับระบบกริด แต่เนื่องจากความถี่ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในกังหันลมมีขนาดต่ำมากและขนาดแรงดันจำเป็นต้องถูกควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับระบบ ซึ่งแรงดันและความถี่ที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันและความถี่ให้เท่ากับระบบกริดเสียก่อน งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ผลที่ได้คือระดับแรงดันและกระแสที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแม้จะอยู่ในสภาวะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดก็ตาม [1] [2] งานวิจัยก็นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองระดับ โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคแบบรูปคลื่นตัดไซน์ ผลที่ได้คือเทคนิคสเปซเวกเตอร์มีการตอบสนองของระบบควบคุมค่อนข้างรวดเร็ว และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก็สม่ำเสมอ อีกทั้งระดับแรงดันที่ได้ก็มากกว่าเทคนิคแบบรูปคลื่นตัดไซน์ [3] ส่วนอีกงานวิจัยได้มีการนำเสนอแบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับเปรียบเทียบกับแบบสองระดับ โดยใช้เทคนิคแบบรูปคลื่นตัดไซน์ ผลที่ได้คือแบบสามระดับได้รูปคลื่นสัญญาณรบกวนที่น้อยกว่าแบบสองระดับ [4] และงานวิจัยถัดมาได้มีการนำเสนอการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ผลที่ได้คือระบบมีประสิทธิภาพที่ดีและสัญญาณรบกวนของกระแสกลดน้อยลง [5] จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการ

จำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์จะได้ระดับรูปคลื่นแรงดันที่เพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้าที่ได้จะมีสัญญาณรบกวนน้อยลงเมื่อเทียบกับแบบวงจรแปลงผันแบบสองระดับที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคแบบรูปคลื่นตัดไซน์

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอแบบจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อเป็นการรองรับการใช้พลังงานทดแทนในอนาคต

2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ [2]



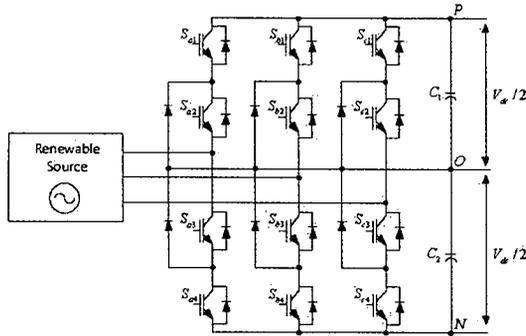
รูปที่ 1 โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่นำเสนอ

โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน (Renewable source) โหลด (Load) และอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดๆ ละ 12 ตัวซึ่งแต่ละชุดจะแบ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) นอกจากนี้ก็มีตัวเก็บประจุ C_1, C_2 ซึ่งอยู่บริเวณที่เรียกว่า DC-Link ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป



3. แบบจำลองการทำงาน

3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) [1]



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับประกอบด้วยไอจีบีที (IGBT) ไดโอด และตัวเก็บประจุ C_1, C_2 ที่ DC-Link ดังรูปที่ 2

โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับจะมีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์โดยใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพื่อกำหนดสถานะในแต่ละกึ่งเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งทั้งสามกึ่งจะได้รับแรงดันเท่ากับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าจากกริดจะไหลไปทางด้านโหลดในขณะที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับจากทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่กริดเพื่อช่วยให้สถานะของการทำงานเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

สมการ(1)และ(2)คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการหมุนของแกนหมุนอ้างอิง(แกน d-q)ตามโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) = v_d i_d \quad (2)$$

เมื่อ e_d, e_q คือเวกเตอร์ของแรงดันกริด และ e_a, e_b, e_c คือส่วนประกอบเวกเตอร์ d-q ของ E_{dq} หลังจากมีการแปลงแกน V_d, V_q จะมีส่วนประกอบเวกเตอร์แรงดันของ V_{dq} ที่ด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แกนหมุน d-q ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการแสดงส่วนประกอบกระแสของแกน d-q (i_d และ i_q) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมกระแส บทความนี้จึงแนะนำให้ i_d และ i_q ใช้การป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวควบคุมที่แยกออกจากลูประสของ i_d และ i_q โดยใช้ตัวควบคุม PI ซึ่งโครงสร้างแรงดันของตัวควบคุมกระแสในแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) คือ

$$\begin{cases} v_d^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ v_q^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ K_{ip}, K_{il} คือสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์และเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญในลูประส i_d^*, i_q^* ที่เป็นพฤติกรรมของกระแส i_d, i_q ดังแสดงในสมการ (4)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right) \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

วงจรทั้งหมดประกอบด้วยลูควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลูควบคุมกระแสแกน d-q และส่วนของการมอดูเลตสัญญาณเพื่ดับบลิว เอ็ม ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวประกอบกำลังของกริดให้มีเสถียรภาพตามความต้องการได้ นอกจากนี้ระบบจะเพิ่มสถานะกระแสไหลย้อนกลับและค่าชดเชยการไหลไปข้างหน้า



ของแรงดันที่ผิดเพี้ยนที่กริด ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงดันได้สมบูรณ์ เมื่อแรงดันในสัญญาณสวิตซ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยการมอดูเลตสัญญาณพีดีบีบลิเวียมที่ป้อนให้กับวงจรหลักเป็นการช่วยเสริมการควบคุมแรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ต้องการ

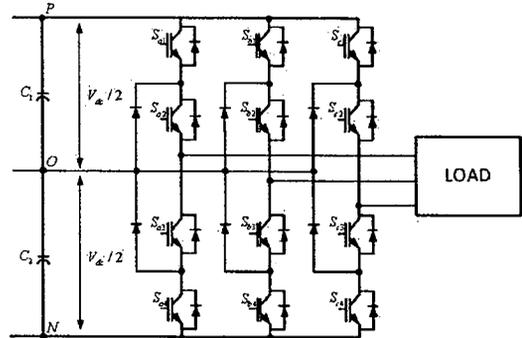
3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้า

กระแสสลับ (Inverter) [5]

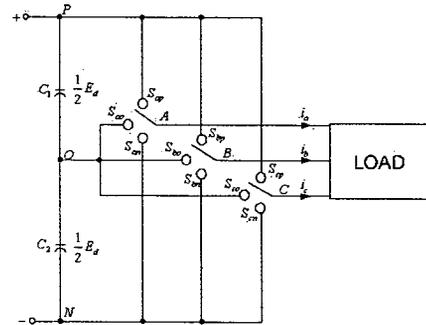
การคล้ายกันของนิยามฟังก์ชันสวิตซ์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับก็เป็นเช่นเดียวกันในการวิเคราะห์จะง่ายขึ้นเมื่อทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดเป็นสวิตซ์ในอุดมคติ ทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเท่ากันที่ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ฟังก์ชันสวิตซ์สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับคือ

$$s_i = \begin{cases} 1 & (u_i = \frac{1}{2}E_d) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & (u_i = -\frac{1}{2}E_d) \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (5)$$

นอกจากนี้แต่ละกิ่งสามารถเปลี่ยนสถานะโดยใช้สวิตซ์ เพราะฉะนั้นแบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับ(รวมทั้งโหลด) ดังแสดงในรูปที่ 4 และฟังก์ชันสวิตซ์ S_i จะแบ่งออกเป็น S_{ip} , S_{io} และ S_{in} เมื่อเปิดแต่ละอันค่าของอันแรกจะเท่ากับหนึ่ง และเมื่อปิดมันก็จะเป็ศูนย์เพราะว่าสองสวิตซ์ที่แต่ละเฟสไม่สามารถเปิดและปิดที่เวลาเดียวกันได้ ดังนั้น S_{ip} , S_{io} , S_{in} จะได้ว่า $S_{ip} + S_{io} + S_{in} = 0$



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 4 จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสามเฟสคือ

$$\begin{cases} u_{AN'} = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + E_a \\ u_{BN'} = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + E_b \\ u_{CN'} = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + E_c \end{cases} \quad (6)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์ดังสมการ (7)

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (7)$$



เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่โพลและแรงดันของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกจะสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

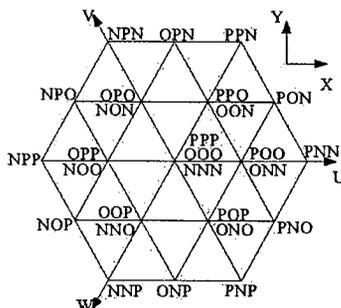
ดังนั้นเมื่อนำสมการ (8) แทนในสมการ (7) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_d}{6L} \times (3S_a - S^*) - \frac{E_a}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_b - S^*) - \frac{E_b}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_c - S^*) - \frac{E_c}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ $S^* = S_a + S_b + S_c$

3.3 การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) [1], [5], [6]

แต่ละเฟสของวงจรสามระดับมีสถานะของสวิตช์อยู่สามสถานะดังนั้นวงจรแบบสามระดับจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ (3^3) โดยแสดงในแต่ละสถานะการณีสวิตช์บนรูปหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ [1], [5], [6]

จากรูปที่ 5 สามารถแบ่งเวกเตอร์ออกเป็น 5 กลุ่มและสรุปในตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้

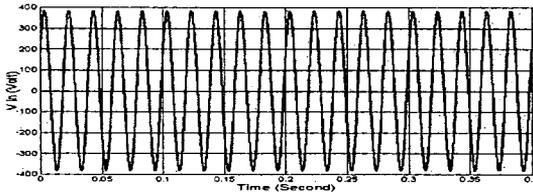
- เวกเตอร์ศูนย์ Zero Voltage Vector (ZVV)
- เวกเตอร์ขนาดกลาง Medium Voltage Vector (MVV)
- เวกเตอร์ขนาดใหญ่ Large Voltage Vector (LVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กตัวบน Upper Small Voltage Vector (USVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กตัวล่าง Lower Small Voltage Vector (LSVV)

ตารางที่ 1 กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน

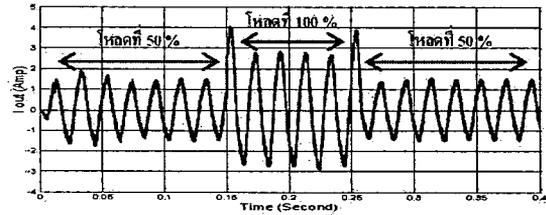
Voltage Vector	Symbols
ZVV	(PPP), (OOO), (NNN)
MVV	(PON), (ONP), (NPO), (NOP), (ONP), (PNO)
LVV	(PNN), (PPN), (NPN), (NPP), (NNP), (PNP)
USVV	(POO), (PPO), (OPO), (OPP), (OOP), (POP)
LSVV	(ONN), (OON), (NON), (NOO), (NNO), (ONO)

4. ผลการจำลอง

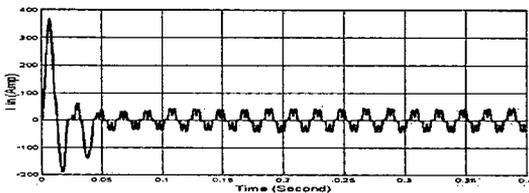
การจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ตัวเก็บประจุที่ DC-Link ตัวละ 4,700 μF ความถี่สวิตซ์ 20kHz โหลดขนาด 1kW(100%)และโหลดขนาด 1/2kW(50%) โดยจะทำการป้อนแรงดันเฟสมีค่าประมาณ 380 V ความถี่ 50Hz ดังรูปที่ 6 และ 7



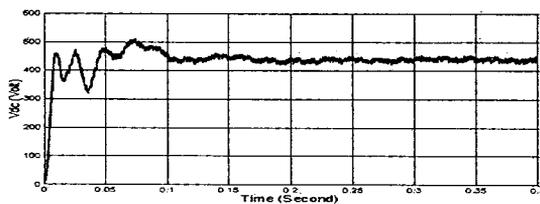
รูปที่ 6 แรงดันของเฟส AB ทางด้านขาเข้า



รูปที่ 10 กระแสของเฟส A ทางด้านขาออก

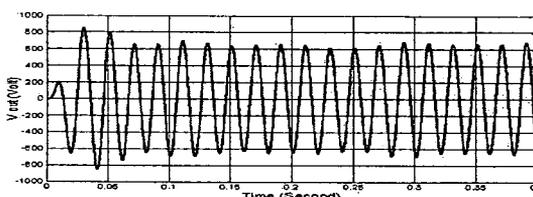


รูปที่ 7 กระแสของเฟส A ทางด้านขาเข้า



รูปที่ 8 แรงดันที่ DC-Link

ในการจำลองจะใช้ระยะเวลา 0.4s จะได้แรงดันที่ DC-Link ประมาณ 450 V ดังรูปที่ 8 ในส่วนของแรงดันด้านขาออกที่เฟส AB มีแรงดันประมาณ 650V และกระแสด้านขาออกที่โหลด 50% ประมาณ 1.5 A และที่โหลด 100% ประมาณ 2.7 A ดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 แรงดันของเฟส AB ทางด้านขาออก

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ โดยแบ่งการทำงานเป็นสองส่วนหลักๆคือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้การมอดูเลตสัญญาณพีดีบีบลิวิตซ์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์สร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งผลที่ได้คือวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ถึงแม้จะมีการเพิ่มและลดโหลดแต่ระบบควบคุมก็สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยรูปคลื่นของแรงดันเพิ่มขึ้นและรูปคลื่นของกระแสก็มีสัญญาณรบกวนน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปคลื่นทางด้านขาเข้า ดังนั้นการจำลองวงจรแปลงผันนี้ได้ผลค่อนข้างดีซึ่งสามารถนำไปพัฒนาออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้าสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wen-xiang, C. Da-peng and Q. Jin-yong, "Study on the Control Strategy of Three-level PWM Rectifier Based on SVPWM", Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'09, IEEE 6th International., 17-20 May 2009, pp.1622-1625.



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

- [2] Z. Yingchao, Z. Zhengming, L. Ting, Z. Yngchang and Y. Liqiang, "A Novel Control Scheme for Three-Level NPC Back-to-Back Converter", Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '08, IEEE., 3-5 Sep. 2008, pp.1-5.
- [3] W. Xu, H Kaizheng, Y. Shijie and X. Bin, "Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on the Space Vector Modulation", Control and Decision Conference, CCDC, Chinese., 2-4 July 2008, pp.1881-1884.
- [4] N. Meejit, A. Jaruensri, "Design and Implementation of 1 kW Diode-Clamped Three-level Inverter" Thesis, Electrical Engineering, Rajamangara University of Technology Thanyaburi, 2010.
- [5] Y. Zhezhi, Y. Lingzhi, P. Hanmei, F. Xi and D. Dong, "Study of Simplified SVPWM Algorithm Based on Three-Level Inverter", Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09.IEEE 6th International, 17-20May2009,pp.876-881.
- [6]C. Piset, P. Wohandech, "Study of Converter Model for Superconducting Magnetic Energy Storage" Thesis, Electrical Engineering, Rajamangara University of Technology Thanyaburi, 2008.
- [7] Z. Jinghua, M. Yongqing, L. Zhengxi and L. Kun "Research on Control Method of Three-Level NPC Voltage Source Rectifier", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08.IEEE, 3-5 Sept. 2008, pp.1-6.
- [8] A. Calle, J. Rocabert, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, S. Alepuz and J. Peracaula "Three-Level Three-Phase Neutral-Point-Clamped Back-to-Back Converter Applied To a Wind Emulator", Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09.13th European Conference on, 8-10 Sept. 2009, pp.1-10.
- [9] P. Mingkhuam, "Minimization of switching losses using SVPWM for Three-Level Inverters" Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
- [10] J. Jaroenkiatrai, "SVPWM-Rectifier with a Small DC-Link Capacitor by using Feedforward Disturbance Rejection Technique" Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.