

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงกำลังเป็นที่ต้องการและได้รับความสนใจในการวิจัย เนื่องจากทำให้แหล่งจ่ายมีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบาลง ความต้องการดังกล่าวสามารถทำได้โดยการให้วงจรทำงานด้วยแรงดันและกระแสที่ค่าความถี่สูงขึ้น [10], [13], [19], [23], [24] โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงเพื่อสร้างแรงดันและกระแสความถี่สูงในระดับหลายสิบหรือหลายร้อย kHz โดยวิธีการนี้จะก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียบางส่วนขึ้นในอุปกรณ์สวิตชิงของวงจรในรูปของกำลังสูญเสียจากการสวิตชิง (switching loss) ซึ่งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่สวิตชิงที่เพิ่มขึ้น เพื่อกำจัดกำลังสูญเสียจากการสวิตชิงที่ความถี่สูงนี้ วงจรทั่วไปซึ่งทำงานแบบ hard switching จะถูกแทนด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่ทำงานแบบ soft switching หรือการทำงานโดยการสวิตชิงขณะแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching, ZVS) ดังนั้นในการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS จึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องมีความเข้าใจเป็นอย่างดีในการทำงานของวงจรพร้อมทั้งเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS หรือไม่อยู่ภายใต้สภาวะ ZVS (Non Zero Voltage Switching, NON-ZVS) อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของวงจรทั้งภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS ในอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ควบคุมด้วยดิโอดีไอซีที่มีเพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตชิง โดยมีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงซึ่งวงจรสมมูลของโหลดทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อทำงานร่วมกับ C สามารถแทนด้วยวงจร RLC เรโซแนนซ์อนุกรม เพื่อใช้วิเคราะห์การทำงานของวงจรโดยละเอียดและนำไปสู่การพิจารณาเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่สามารถส่งผลต่อการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS ดังกล่าว

เมื่อใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟตจะมีตัวเก็บประจุแฝงต่ออยู่ระหว่างเดรนและซอร์สซึ่งเรียกว่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต (output capacitor :  $C_{oss}$ ) ดังนั้นในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตถูกควบคุมให้ทำงาน (นำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันไป) เพื่อสร้างแรงดันคลื่นสแควร์ (square wave) ความถี่สูงที่ค่าดิโอดีไอซีแตกต่างกัน สำหรับจ่ายให้โหลดด้านเอาต์พุตจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างเดรนและซอร์สดังกล่าวนี้ต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วย [8]-[14] โดยที่ขบวนการขนถ่ายประจุเข้าออก

(charge-discharge) ของตัวเก็บประจุทั้ง 4 ที่มีในตัวอุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตทั้ง 4 ของอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของสวิตช์มอสเฟตเหล่านี้ กล่าวคือถ้าขบวนการขนถ่ายประจุสำเร็จก่อนการเริ่มนำกระแสของสวิตช์ในลำดับถัดไป ก็จะสามารทำให้สวิตช์เริ่มนำกระแสในขณะแรงดันคร่อมสวิตช์เท่ากับศูนย์ (ZVS) แต่ถ้าขบวนการขนถ่ายประจุไม่สามารถสำเร็จก่อนการเริ่มนำกระแสของสวิตช์ในลำดับถัดไปก็จะทำให้สวิตช์เริ่มนำกระแสในขณะแรงดันคร่อมสวิตช์ไม่เท่ากับศูนย์ (NON-ZVS) [8]-[13] สวิตช์ก็จะได้รับความเสียหายได้

มีบางงานวิจัยที่นำเสนอไว้แล้วในการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายโหลดครึ่งโวลต์ที่อนุกรมที่มีการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS แต่ไม่ได้นำเอาผลของตัวเก็บประจุเอาท์พุท ( $C_{oss}$ ) ของเพาเวอร์มอสเฟตรวมเข้ามาในการวิเคราะห์ด้วย [18], [19], [25]-[27] ส่งผลทำให้การพิจารณาความถี่ในการสวิตช์ภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์เป็นเพียงค่าโดยประมาณ และมีบางงานวิจัยที่ได้อธิบายผลกระทบของตัวเก็บประจุเอาท์พุท ( $C_{oss}$ ) ของเพาเวอร์มอสเฟตที่มีต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [13]-[17] แต่ไม่ได้แสดงโหมดการทำงานที่เกิดจากการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุไว้ทำให้ไม่เห็นกลไกการทำงานที่แท้จริงของวงจรได้ถูกต้องชัดเจน และไม่ได้ทำการวิเคราะห์หาสมการของคลื่นแรงดันและกระแสในแต่ละโหมดการทำงานของวงจรทำให้ไม่สามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่จะส่งผลต่อการเกิดสภาวะใดสภาวะหนึ่งของ ZVS และ NON-ZVS ได้อย่างถูกต้อง

สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอนี้จะนำเอาผลกระทบของตัวเก็บประจุเอาท์พุท ( $C_{oss}$ ) ระหว่างเดรนและซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟตที่มีต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์นี้รวมเข้ามาในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาโหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาท์พุทซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์หาสมการของคลื่นแรงดันและกระแสในแต่ละโหมดการทำงานของวงจร และจากสมการคลื่นแรงดันและกระแสเหล่านี้ทำให้ได้คลื่นจากการคำนวณเพื่อใช้เป็นเครื่องมือนำไปสู่การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรเพื่อพิจารณาเงื่อนไขการเกิดสภาวะ ZVS หรือ NON-ZVS ของวงจรในที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่ใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจ่ายโหลดครึ่งโวลต์ที่อนุกรมของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยดิวิตีไซเคิล เพื่อวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่ได้โดยมีการเพิ่มโหมดการทำงานที่เกิดจากการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_{oss}$  รวมเข้าไปในการวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจกลไกการทำงานที่แท้จริงของวงจรได้ถูกต้องชัดเจนตลอดย่านของการ

ปรับค่าควิตซ์ไซเคิล (Duty Cycle) ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานของวงจรภายใต้สถานะ ZVS และ NON-ZVS หลักการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับผู้ออกแบบวงจรดังกล่าวให้ทำงานได้อย่างถูกต้องปลอดภัยภายใต้สถานะ ZVS

### 1.3 สมมติฐานการวิจัย

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์จ่ายโพลครโซแนนท์อนุกรมที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยควิตซ์ไซเคิลถ้ากำหนดให้สวิตช์เป็นแบบอุดมคติซึ่งไม่มีตัวเก็บประจุ  $C_{oss}$  ต่ออยู่ระหว่างเดรนและซอร์สของสวิตช์ ในระหว่างการปรับค่าควิตซ์ไซเคิลเพื่อปรับค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตนั้น สามารถทำนายได้ว่าการทำงานภายใต้สถานะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้นเสมอถ้ามีการปรับเพิ่มความเร็วสวิตช์ซึ่งให้ค่าสูงพอที่จะทำให้มุมเฟสของกระแสเอาต์พุตไม่นำหน้าทั้งขอบหน้าบวกและลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต [13]-[15] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติที่มีการใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์จะพบว่าไม่มีตัวเก็บประจุ  $C_{oss}$  ต่ออยู่ระหว่างเดรนและซอร์สของสวิตช์มอสเฟต ทำให้การทำงานภายใต้สถานะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์อาจจะไม่เกิดขึ้นถึงแม้ว่ามุมเฟสของกระแสเอาต์พุตจะไม่นำหน้าทั้งขอบหน้าบวกและลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุตก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานในตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรโซแนนท์มีค่าไม่มากพอที่จะดิสชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{oss}$  ได้เสร็จสมบูรณ์ก่อนสวิตช์ดังกล่าวจะเริ่มนำกระแสในจังหวะถัดไป [13] ดังนั้นการที่ยังคงรักษาสถานะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ภายใต้สถานะ ZVS ได้นั้นจะต้องปรับเพิ่มความถี่ขึ้นไปอีกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสวิตช์ในทางอุดมคติดังกล่าวข้างต้น แต่เงื่อนไขในการทำงานภายใต้สถานะ ZVS หรือเงื่อนไขที่ทำให้การดิสชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{oss}$  ได้เสร็จสมบูรณ์ก่อนสวิตช์เริ่มนำกระแสในจังหวะถัดไปจะมาถึง ก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วสวิตช์ซึ่งเพียงตัวแปรเดียวเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นในวงจรด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อการเกิดสถานะ ZVS หรือ NON-ZVS ทั้งหมด 4 ตัวแปรได้แก่ ค่าความเร็วสวิตช์ ( $f_s$ ) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุต ( $I_{o1}$ ) ค่ามุมเฟสล่าช้าขององค์ประกอบหลักมูล ( $\theta_1$ ) และค่าเวลาการชาร์จประจุประจุวิกฤติ ( $T_{Ch}$ ) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถใช้กำหนดจุดแบ่งรอยต่อระหว่างสถานะ ZVS และ NON-ZVS ของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลใดๆ ได้

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ควบคุมด้วยควิตซ์ไซเคิลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการศึกษาขบวนการขนถ่ายประจุ  $C_{oss}$  ของสวิตช์มอสเฟต

ทั้ง 4 ตัวในแต่ละจังหวะการทำงานของวงจรภายในหนึ่งไซเคิลของการสวิตช์ เมื่อเข้าใจใน ขบวนการขนถ่ายประจุตลอดย่านของการควบคุมด้วยตัวดีไอซีเคิล ทำให้สามารถวิเคราะห์หาวงจร แสดงการทำงานในแต่ละโหมดในหนึ่งไซเคิลของการสวิตช์ได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาสมการของ แรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรทั้งหมดเพื่อพล็อตคลื่นจากสมการเหล่านี้โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ และใช้คลื่นคำนวณของแรงดันและกระแสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะทำงานภายใต้สภาวะ Critical ZVS ซึ่งเป็นสภาวะที่แบ่งรอยต่อระหว่าง ZVS และ NON-ZVS ในการพิจารณาตัวแปรวิกฤติ 4 ตัวแปรได้แก่ ค่าความถี่สวิตช์วิกฤติ ( $f_{s,c}$ ) ค่าพิคของ องค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาท์พุทวิกฤติ ( $I_{o1,c}$ ) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูล วิกฤติ ( $\theta_{1,c}$ ) และค่าเวลาการชาร์จประจุประจุวิกฤติ ( $T_{Ch,c}$ ) ซึ่งตัวแปรวิกฤติเหล่านี้จะอยู่บนเส้น แบ่งรอยต่อระหว่างสภาวะ ZVS และ NON-ZVS ตลอดย่านของการปรับค่าดีไอซีเคิลพร้อมทั้ง ยืนยันความถูกต้องของหลักการวิเคราะห์ที่นำเสนอนี้ด้วยผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่จะ สร้างขึ้น

### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

อินเวอร์เตอร์ : วงจรแปลงกำลังไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) เป็นกระแสสลับ (AC)

square wave : คลื่นแรงดันหรือกระแสที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม

ZVS : สภาวะการทำงานของวงจรที่มีการสวิตช์ขณะแรงดันเท่ากับศูนย์

NON-ZVS : สภาวะการทำงานของวงจรที่มีการสวิตช์ขณะแรงดันไม่เท่ากับศูนย์

Critical ZVS : สภาวะการทำงานของวงจรตรงตำแหน่งระหว่าง ZVS และ NON-ZVS

การควบคุมดีไอซีเคิล : การควบคุมเนื้อที่แรงดัน-เวลาของคลื่นแรงดันเอาท์พุท

$C_{oss}$  : ตัวเก็บประจุแฝงระหว่างเดรนและซอร์สของมอสเฟต

switching loss : กำลังสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร

induction heating : การให้ความร้อนกับชิ้นงานด้วยการเหนี่ยวนำ

ความถี่สวิตช์วิกฤติ : ความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ที่ทำให้วงจรทำงานในสภาวะ

Critical ZVS

กระแสเอาท์พุทวิกฤติ : กระแสเอาท์พุทขณะวงจรทำงานในสภาวะ Critical ZVS

เวลาการชาร์จประจุวิกฤติ : เวลาในการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างเดรนและ ซอร์สของมอสเฟตขณะวงจรทำงานในสภาวะ Critical ZVS

## 1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

หลักการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมขณะจ่ายโหลดประเภทอื่นที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยดิฟเฟอเรนเชียลได้ ในการใช้งานนี้ผู้ออกแบบวงจรจะต้องเข้าใจถึงเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS และพิจารณาได้อย่างถูกต้องถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิฟเฟอเรนเชียล (D) และความถี่สวิต칭 ( $f_s$ ) โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เพาเวอร์มอสเฟตที่มีขนาดพิกัดสูงซึ่งจะมีค่า  $C_{oss}$  ที่มากกว่า ความถี่สวิต칭จะต้องถูกออกแบบให้มีค่าสูงกว่ากรณีพิกัดขนาดเล็กซึ่งมีค่า  $C_{oss}$  ที่น้อยกว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าดิฟเฟอเรนเชียลหรือที่ระดับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเดียวกัน เพื่อให้วงจรสามารถทำงานในสภาวะ ZVS ได้เหมือนเดิมเป็นการป้องกันสวิตช์ทุกตัวในวงจรไม่ให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS ของวงจร ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวนี้จะต้องมีการควบคุมทั้งค่าดิฟเฟอเรนเชียลและความถี่สวิต칭ไปพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างปลอดภัยภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดช่วงการควบคุม