

บทที่ 4

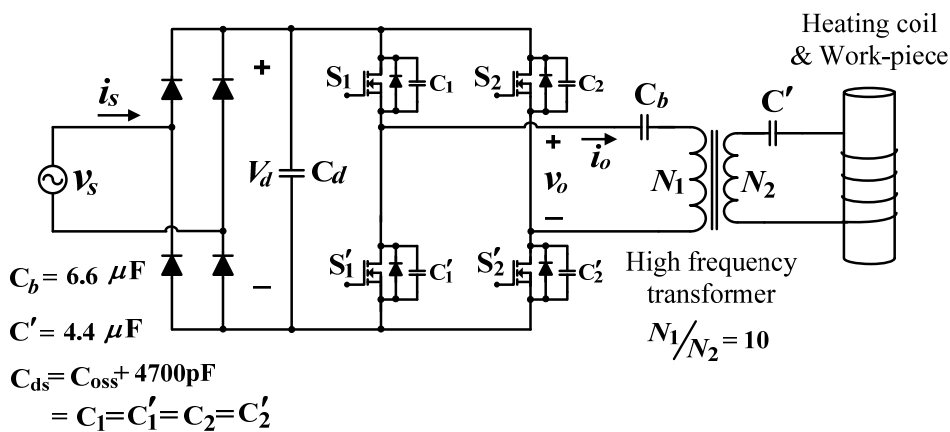
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายใต้สถานะ ZVS และ NON-ZVS โดยมีการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิล

4.1. บทนำ

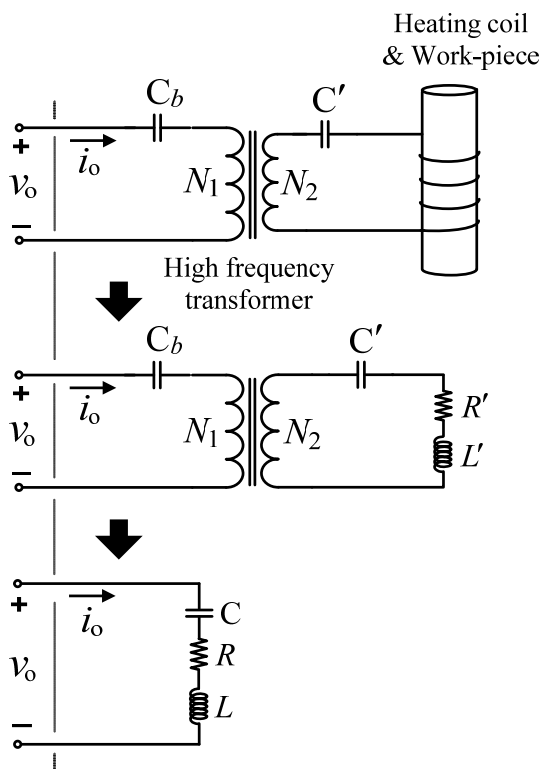
วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่มีเพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์สำหรับจ่ายโหลดที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) ในส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานสามารถแทนด้วย $R' L'$ อนุกรมซึ่งรายละเอียดกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.2 ในขณะที่ C_b และ C' คือตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสกัดองค์ประกอบดิซี (Blocking Capacitor) และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ (Resonant Capacitor) ตามลำดับ เมื่อย้ายตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเหล่านี้มารวมไว้ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด (N_1/N_2) เท่ากับ 10 จะได้วงจรสมมูลด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แทนด้วย RLC อนุกรมดังรูปที่ 4.1(ข) ส่วนของสวิตช์แต่ละตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยเพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP460 จำนวน 2 ตัวขนานกัน โดยที่เพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัวจะมีค่าของตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Output Capacitor : C_{oss}) ต่ออยู่ระหว่างเดรน-ซอร์สภายในค่าเท่ากับ 870 pF และเพื่อขยายช่วงเวลาของโหมคการทำงานที่มีการขนถ่ายประจุให้เห็นลักษณะคลื่นแรงดัน กระแสและกลไกของการขนถ่ายประจุได้อย่างชัดเจนได้เพิ่มตัวเก็บประจุภายนอกค่าเท่ากับ 4700 pF ต่อขนานเพิ่มเข้าไประหว่างเดรนและซอร์สของสวิตช์ร่วมกับค่าตัวเก็บประจุ $C_{oss} = 870$ pF ภายในของมอสเฟตสองตัวขนานกันทำให้ค่าของตัวเก็บประจุรวมที่ต่ออยู่ระหว่างเดรนและซอร์สของสวิตช์แต่ละตัวเท่ากับ $(870 \text{ pF} \times 2) + 4700 \text{ pF} = 6440 \text{ pF}$ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์ส ($C_{ds} = C_1 = C_1' = C_2 = C_2' = 6440 \text{ pF}$)

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลที่จะกล่าวถึงในบทนี้เริ่มจากการศึกษาขบวนการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์สของสวิตช์ทั้ง 4 ตัวในแต่ละจังหวะการทำงานของวงจรภายในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุต จากความเข้าใจในขบวนการขนถ่ายประจุทำให้สามารถวิเคราะห์หาจรรยาบรรณการทำงานในแต่โหมคในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาสมการของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรทั้งหมดที่กำหนดให้มีขั้วอ้างอิงของแรงดันและทิศทางอ้างอิงของกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.2 สามารถพล็อตคลื่นแรงดันและกระแสจากสมการเหล่านี้ทั้งภายใต้สถานะ ZVS และ NON-ZVS โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ ในขณะที่จุดแบ่งรอยต่อระหว่างสถานะ ZVS และ NON-ZVS ซึ่งเรียกว่าสถานะ Critical ZVS ก็จะพิจารณาจากคลื่นที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัย

สมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ที่จุด Critical ZVS นี้ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการเกิด ZVS หรือ NON-ZVS ของวงจร โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป

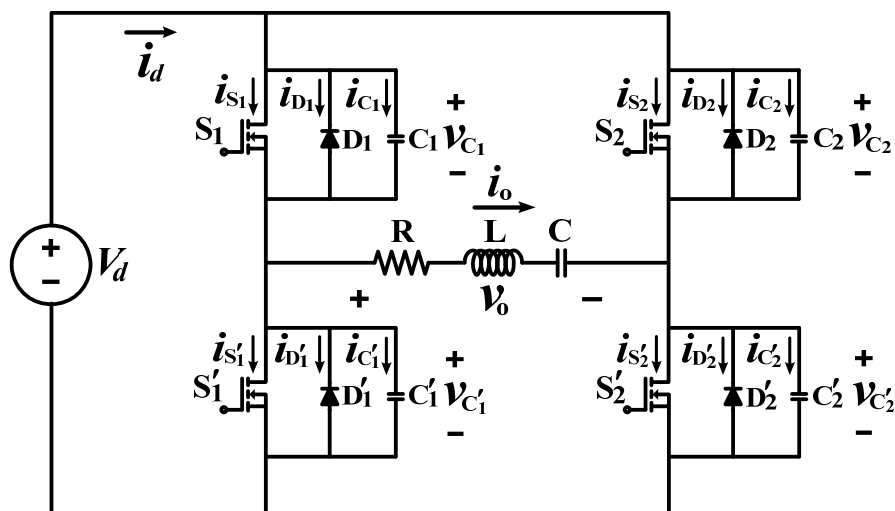


(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์จ่ายโหลดที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง



(ข) วงจรสมมูลด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ซึ่งแทนด้วยวงจร RLC เรโซแนนท์อนุกรม

รูปที่ 4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์และวงจรสมมูลด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลดที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

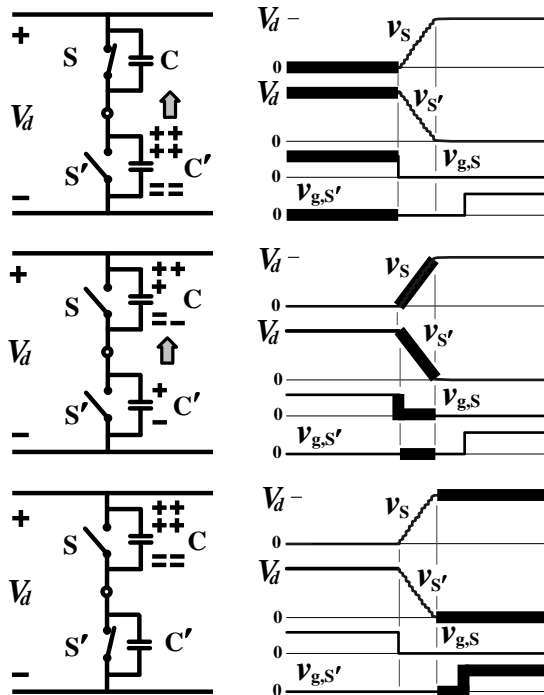


รูปที่ 4.2 ขั้วอ้างอิงของแรงดันและทิศทางอ้างอิงของกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์จ่ายโหลดที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำซึ่งแทนด้วย RLC อนุกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้

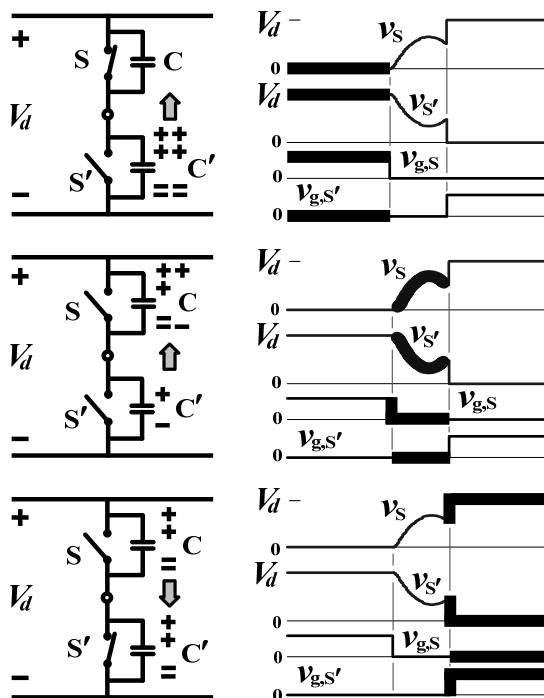
4.2 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายใต้สถานะ ZVS และ NON-ZVS

4.2.1 ขบวนการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์สของสวิตช์มอสเฟต

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์นั้นจะควบคุมให้สวิตช์มอสเฟตตัวบน (S) และตัวล่าง (S') ของแต่ละกึ่งนำกระแสสลับกันไปในแต่ละครึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุทพร้อมกันนี้จะมีการขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์ส (C_{ds}) ของสวิตช์ตัวบน (C) และตัวล่าง (C') เกิดขึ้น โดยการขนถ่ายประจุในแต่ละกึ่งของอินเวอร์เตอร์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ทั้งคู่หยุดนำกระแสและมีโอกาสเกิดขึ้นได้สองสถานะคือ (1) การขนถ่ายประจุได้สำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึงซึ่งเป็นกรณีที่สวิตช์ทำงานถูกต้อง แรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตตัวที่จะเริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปมีค่าเท่ากับศูนย์ (ZVS) (2) การขนถ่ายประจุไม่สำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึงซึ่งเป็นกรณีที่สวิตช์ทำงานไม่ถูกต้อง ยังคงมีแรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตตัวที่จะเริ่มนำกระแสในลำดับถัดไป (NON-ZVS) ตัวอย่างการขนถ่ายประจุจากตัวเก็บประจุของสวิตช์มอสเฟตตัวล่างไปยังตัวเก็บประจุของสวิตช์มอสเฟตตัวบนก่อนการเริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปของสวิตช์มอสเฟตตัวล่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยในรูปที่ 4.3(ก) เป็นกรณีที่การขนถ่ายประจุสำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึงทำให้สวิตช์มอสเฟตตัวล่างทำงานภายใต้สถานะ ZVS ส่วนในรูปที่ 4.3(ข) เป็นกรณีที่การขนถ่ายประจุไม่สำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึง ทำให้สวิตช์มอสเฟตตัวล่างทำงานภายใต้สถานะ NON-ZVS

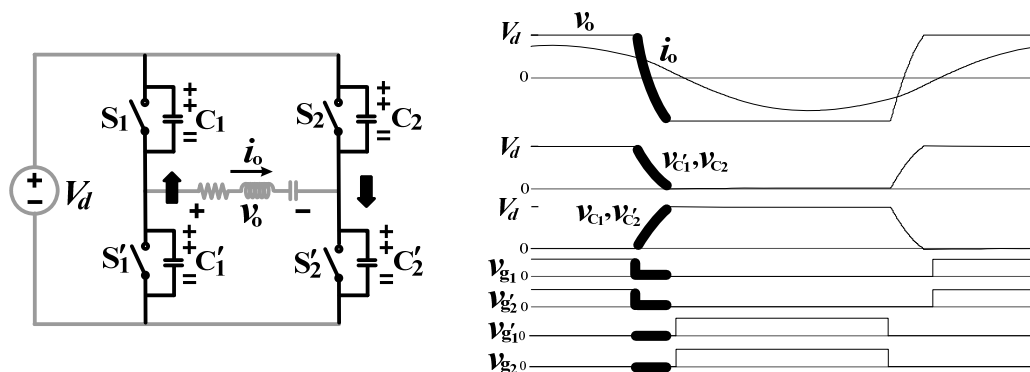


(ก) การขนถ่ายประจุสำเร็จก่อนสัญญาณควบคุมความถี่มาถึง ทำให้สวิตช์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS

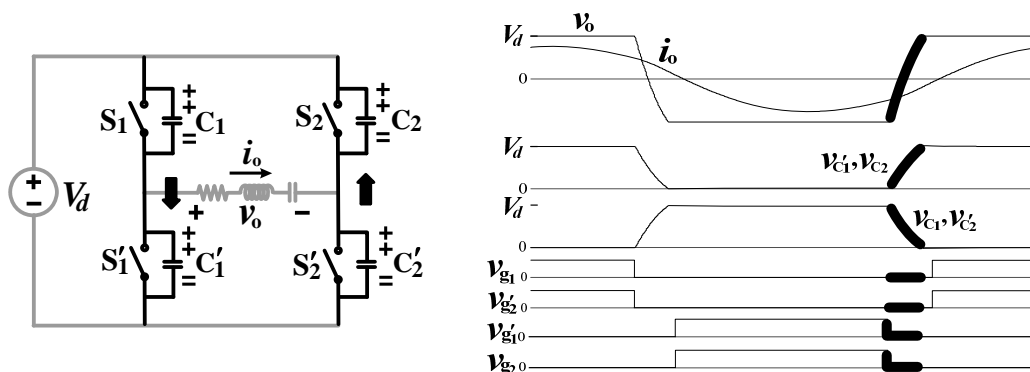


(ข) การขนถ่ายประจุไม่สำเร็จก่อนสัญญาณควบคุมความถี่มาถึง ทำให้สวิตช์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS

รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตในระหว่างที่มีการขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์



(ก) การขนถ่ายประจุจาก C_1' ไปยัง C_1 และจาก C_2 ไปยัง C_2' ขณะที่แรงดันเอาต์พุตกำลังเปลี่ยนระดับจาก $+V_d$ ไปเป็น $-V_d$



(ข) การขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_1' และจาก C_2' ไปยัง C_2 ขณะที่แรงดันเอาต์พุตกำลังเปลี่ยนระดับจาก $-V_d$ ไปเป็น $+V_d$

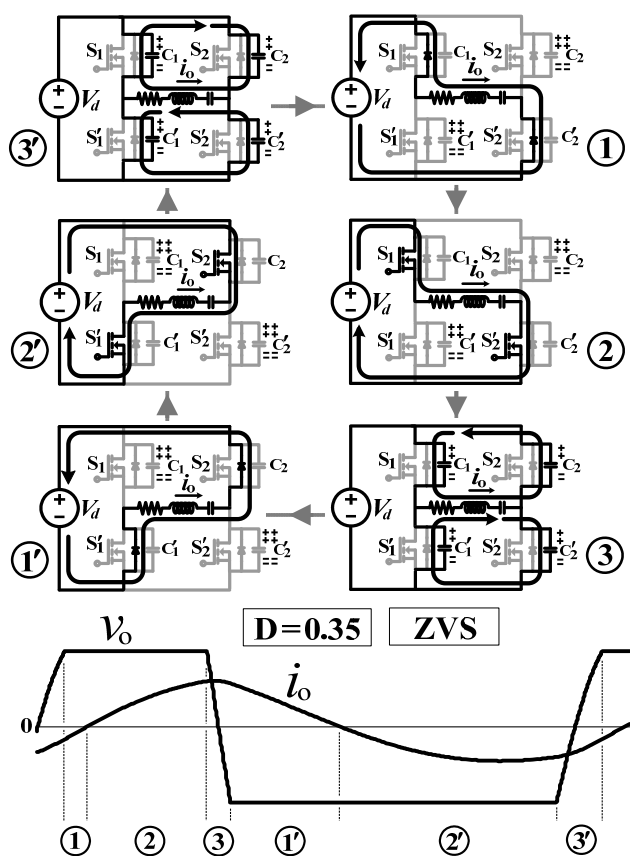
รูปที่ 4.4 ลำดับการขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของตัวเก็บประจุสวิตช์ภายในหนึ่งไซเคิลของแรงดันเอาต์พุต

การทำงานของอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เพื่อสร้างคลื่นแรงดันเอาต์พุตหนึ่งไซเคิล จะมีการขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุของสวิตช์ตัวบนและตัวล่างในแต่ละกิ่ง ซึ่งลำดับในการขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์ภายในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยเริ่มพิจารณาจากขณะคลื่นแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $+V_d$ ในครึ่งไซเคิลบวกจะมีประจุอยู่เต็มในตัวเก็บประจุ C_1' และ C_2 มีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองเท่ากับ V_d และไม่มีประจุที่ C_1 และ C_2' มีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองเท่ากับศูนย์ การทำงานของสวิตช์มอสเฟตในลำดับถัดไปเพื่อให้ได้คลื่นแรงดันเอาต์พุตในครึ่งไซเคิลลบมีค่าเท่ากับ $-V_d$ จะต้องควบคุมสวิตช์มอสเฟต S_1' และ S_2 ให้นำกระแสในลำดับถัดไป ซึ่งก่อนที่สวิตช์มอสเฟตทั้งสองตัวนี้จะถูกควบคุมให้เริ่มนำกระแสจะมีการขนถ่ายประจุออกจากตัวเก็บประจุ C_1' และ C_2 ของสวิตช์ทั้งสองตัวนี้ก่อนเพื่อให้สวิตช์มอสเฟต S_1' และ S_2 เริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปได้อย่างปลอดภัยภายใต้

สภาวะ ZVS โดยจะมีการขนถ่ายประจุจาก C'_1 ไปยัง C_1 และจาก C_2 ไปยัง C'_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) ในทำนองเดียวกันก่อนที่จะควบคุมให้สวิตช์มอสเฟต S_1 และ S'_2 ให้เริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปเพื่อให้ได้คลื่นแรงดันเอาต์พุตในครึ่งโวลต์เซลบวกลบมีค่าเท่ากับ $+V_d$ จะมีการขนถ่ายประจุออกจากตัวเก็บประจุ C_1 และ C'_2 ของสวิตช์ก่อนเพื่อให้สวิตช์มอสเฟต S_1 และ S'_2 เริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปได้อย่างปลอดภัยภายใต้สภาวะ ZVS โดยจะมีการขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C'_1 และจาก C'_2 ไปยัง C_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข)

4.2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดต่างๆ ภายใต้สภาวะ ZVS

จากความเข้าใจในกลไกการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์และขบวนการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์สของสวิตช์มอสเฟต ทำให้สามารถวิเคราะห์ห้วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ (ตัวอย่าง $D = 0.35$) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 มีทั้งหมด 6 โหมดได้แก่โหมด ①②③①'②'③'



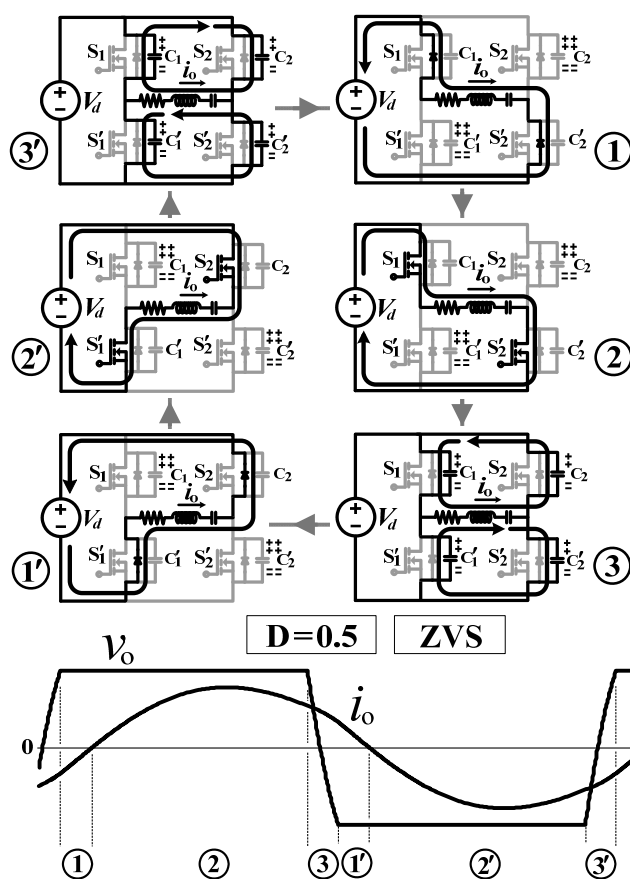
รูปที่ 4.5 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ ($D = 0.35$)

โดยที่

โหมด ① และ ④ คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) ในครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุตตามลำดับ

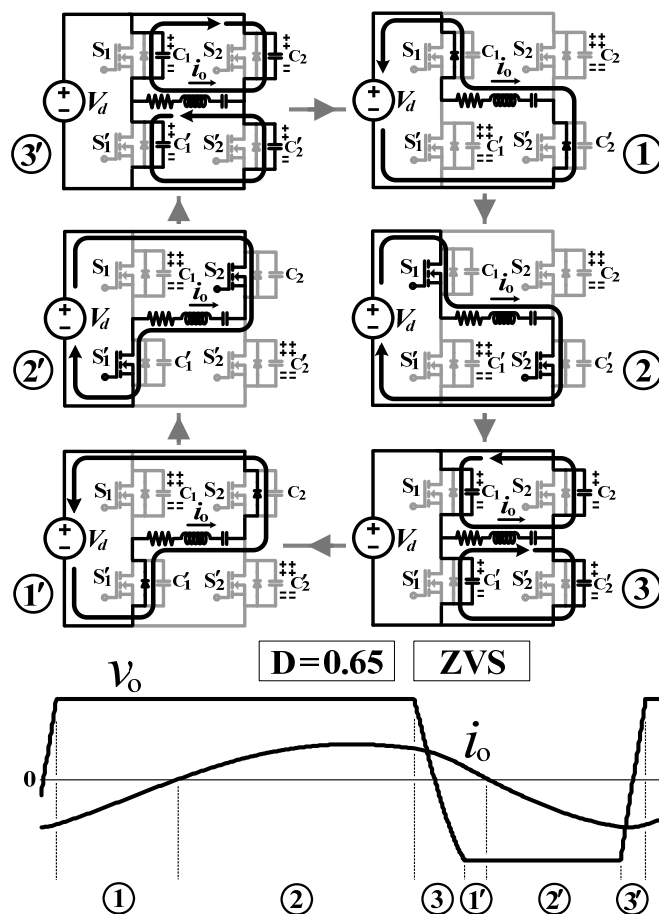
โหมด ② และ ⑤ คือโหมดเพาเวอร์ริง (Powering) ในครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุตตามลำดับ

โหมด ③ และ ⑥ คือโหมดขนถ่ายประจุ (Charge Transfer) โดยในโหมด ③ มีการขนถ่ายประจุจาก C_2 ไปยัง C'_2 และจาก C'_1 ไปยัง C_1 ส่วนในโหมด ⑥ มีการขนถ่ายประจุจาก C'_2 ไปยัง C_2 และจาก C_1 ไปยัง C'_1



รูปที่ 4.6 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D=0.5$

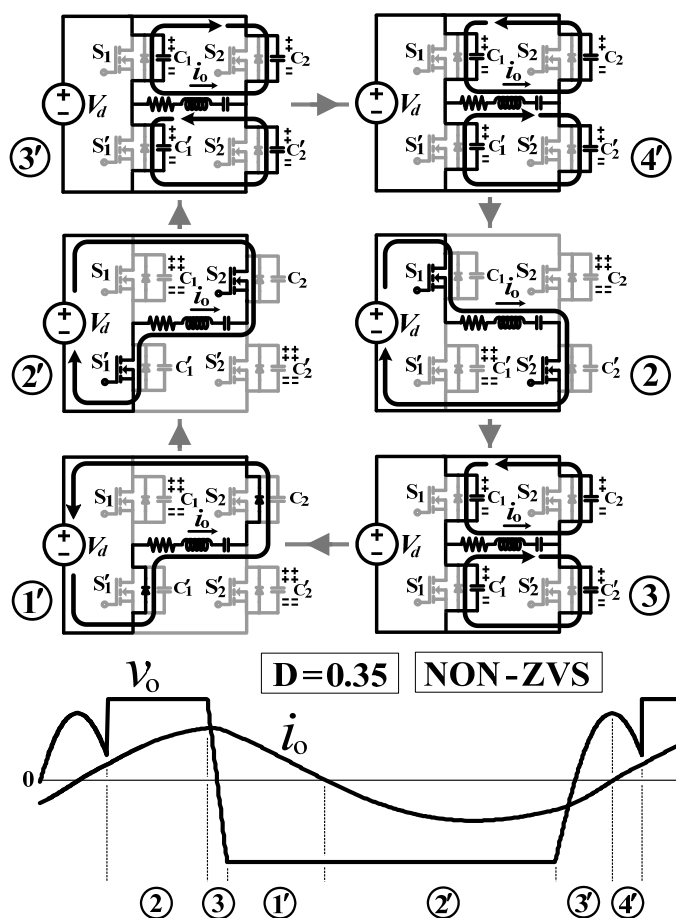
วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D=0.5$ และ $D>0.5$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับซึ่งมีทั้งหมด 6 โหมดได้แก่โหมด ①②③④⑤⑥ เช่นเดียวกับกรณี $D<0.5$



รูปที่ 4.7 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ ($D = 0.65$)

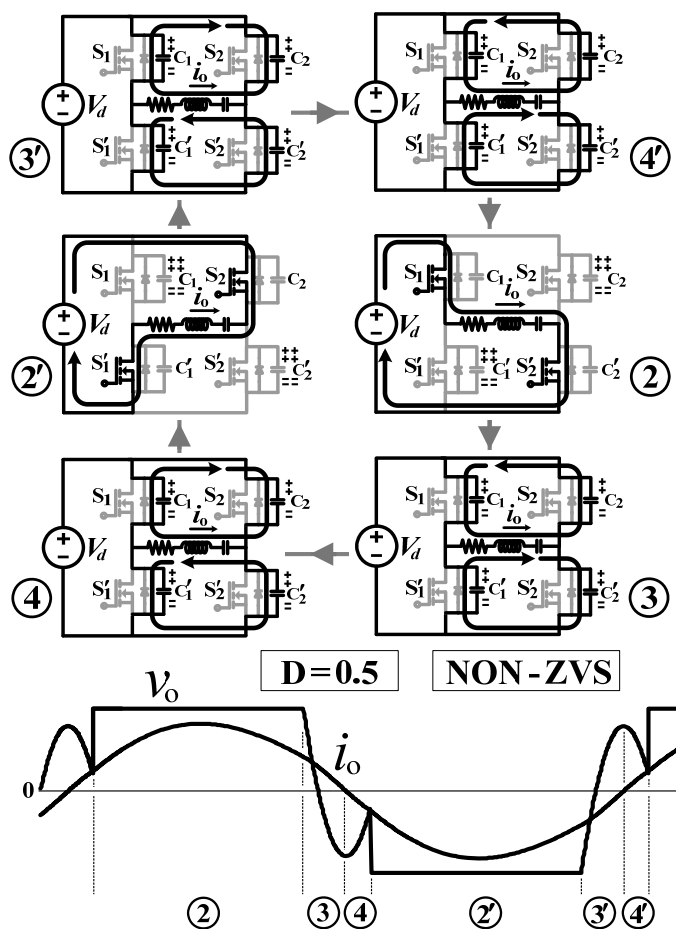
4.2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดต่างๆ ภายใต้สภาวะ NON-ZVS

วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ (ตัวอย่าง $D = 0.35$) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 มีทั้งหมด 6 โหมดได้แก่โหมด ②③①'②'③'④ ซึ่งจะไม่มีการทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต(โหมด ①) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS แต่จะมีโหมดขนถ่ายประจุกลับ (reverse charge transfer) เพิ่มขึ้นมาแทนคือโหมด ④ โดยมีการขนถ่ายประจุจาก C_1' ไปยัง C_1 และจาก C_2 ไปยัง C_2' ซึ่งมีทิศทางขนถ่ายประจุตรงข้ามกับโหมด ③



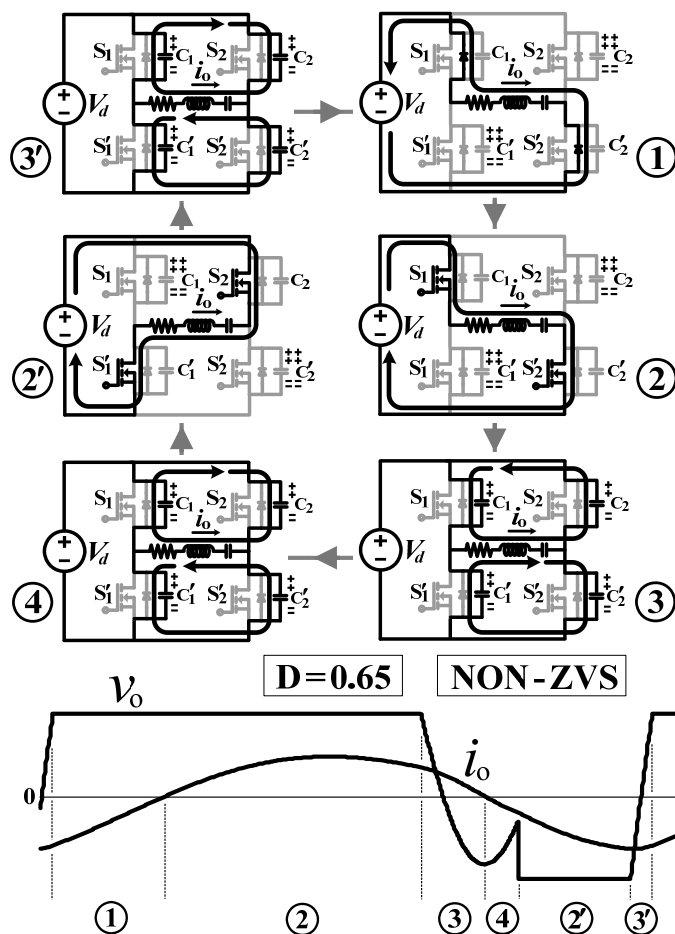
รูปที่ 4.8 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ ($D = 0.35$)

วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D = 0.5$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 มีทั้งหมด 6 โหมดได้แก่โหมด ②③④②③④ ซึ่งจะไม่มีการทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟทั้งในครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (โหมด ① และ ①') เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS แต่จะมีโหมดขนถ่ายประจุกลับ (Reverse Charge Transfer) เพิ่มขึ้นแทนคือโหมด ④ และโหมด ④' โดยที่การทำงานในโหมด ④ จะมีการขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_1' และจาก C_2' ไปยัง C_2 ซึ่งมีทิศทางการขนถ่ายประจุตรงข้ามกับโหมด ③ และการทำงานในโหมด ④' จะมีการขนถ่ายประจุจาก C_1' ไปยัง C_1 และจาก C_2 ไปยัง C_2' ซึ่งมีทิศทางการขนถ่ายประจุตรงข้ามกับโหมด ③'



รูปที่ 4.9 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D=0.5$

วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคิลของแรงดันเอาต์พุตขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ (ตัวอย่าง $D = 0.65$) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 มีทั้งหมด 6 โหมดได้แก่โหมด ①②③④⑤⑥ ซึ่งจะไม่มีการทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลกลับของคลื่นแรงดันเอาต์พุต(โหมด ①) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS แต่จะมีโหมดขนถ่ายประจุกลับ (Reverse Charge Transfer) เพิ่มขึ้นมาแทนคือโหมด ④ ซึ่งจะมีการขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_1' และจาก C_2 ไปยัง C_2' ซึ่งมีทิศทางการขนถ่ายประจุตรงข้ามกับโหมด ③



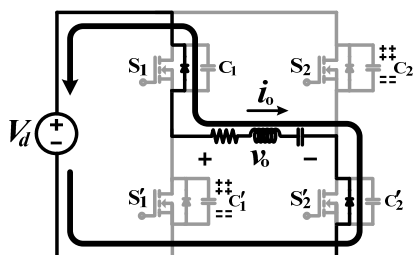
รูปที่ 4.10 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ ($D=0.65$)

4.2.4 การวิเคราะห์หาสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS

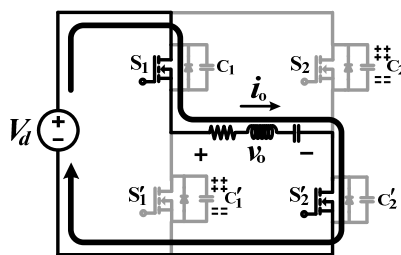
โดยอาศัยวงจรแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 4.5-4.10 สามารถวิเคราะห์หาสมการแรงดันและกระแสในส่วนต่าง ๆ ของวงจรได้ดังต่อไปนี้

จากวงจรแสดงการทำงานของโหมด ① และ ② ในรูปที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข) ตามลำดับ ซึ่งมีวงจรสมมูลของทั้งสองโหมดเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค) สามารถวิเคราะห์หาสมการกระแสเอาต์พุต (i_o) ขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด ① และ ② นี้ได้ดังสมการ

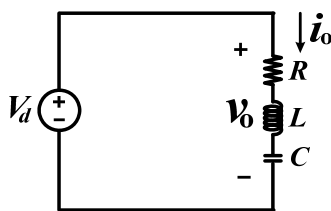
$$i_o = e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] \tag{4.1}$$



(ก) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ①



(ข) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ②



(ค) วงจรสมมูลของการทำงานในโหมด ① และ ②

รูปที่ 4.11 วงจรแสดงการทำงานในโหมด ① และ ② พร้อมทั้งวงจรสมมูล

แรงดันเอาต์พุต (v_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมด ① และ ② มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันคร่อม R L และ C สมมูลของวงจรเรโซแนนท์อนุกรมและมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีอินพุต (V_d) ดังสมการ

$$v_o = v_R + v_L + v_C = V_d \tag{4.2}$$

จากสมการกระแสเอาต์พุต (4.1) นำไปสู่การวิเคราะห์หาสมการแรงดันคร่อมตัวต้านทานสมมูลของโหลด (v_R) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์สมมูล (v_L) และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์สมมูล (v_C) ของการทำงานในโหมด ① และ ② นี้สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$v_R = e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] R \tag{4.3}$$

$$v_L = (V_d - V - 2\alpha LI)e^{-\alpha t} \cos \omega_1 t + \left(\frac{\alpha(-V_d + V) + LI(\alpha^2 - \omega_1^2)}{\omega_1} \right) e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t \tag{4.4}$$

$$v_C = \frac{(V_d - V)}{LC(\alpha^2 + \omega_1^2)} \left[1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_1 t - \frac{\alpha}{\omega_1} e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t \right] + \frac{I}{C\omega_1} e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t + V \quad (4.5)$$

โดยที่ :

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

I คือค่าเริ่มต้นของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

V คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

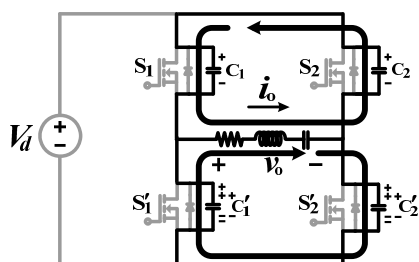
สำหรับการทำงานของวงจรในโหมด ① และ ② นี้จะไม่มีการขนถ่ายประจุเกิดขึ้นระหว่างตัวเก็บประจุของสวิตช์ทั้ง 4 ตัวทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของสวิตช์แต่ละตัวมีค่าคงที่ดังนี้

$$v_{C_1} = 0$$

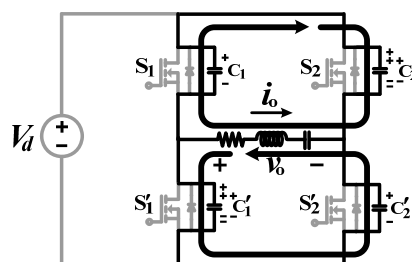
$$v_{C'_1} = V_d$$

$$v_{C_2} = V_d$$

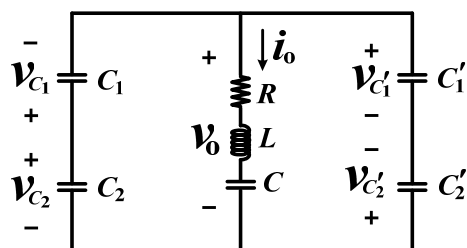
$$v_{C'_2} = 0$$



(ก) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ③



(ข) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ④



(ค) วงจรสมมูลของการทำงานในโหมด ③ และ ④

รูปที่ 4.12 วงจรแสดงการทำงานในโหมด ③ และ ④ พร้อมทั้งวงจรสมมูล

จากวงจรแสดงการทำงานของโหมด ③ และ ④ ในรูปที่ 4.12(ก) และ 4.12(ข) ตามลำดับ ซึ่งมีวงจรสมมูลของทั้งสองโหมดเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.12(ค) สามารถวิเคราะห์หาสมการกระแสเอาต์พุต (i_o) ขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด ③ และ ④ นี้ได้ดังสมการ

$$i_o = \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2'}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] \quad (4.6)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.12(ค) สามารถวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต (v_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมด ③ และ ④ นี้ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} v_o &= v_{C_2} - v_{C_1} \\ &= \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right) \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega_2^2} \right) \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] + (V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (4.7)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุต (v_o) ขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด ③ และ ④ เดียวกันนี้ได้จากผลรวมของแรงดันคร่อม R L และ C สมมูลของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมของโหมดดังสมการ

$$v_o = v_R + v_L + v_C \quad (4.9)$$

โดยที่แรงดันคร่อมตัวต้านทานสมมูลของโหมด (v_R) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์สมมูล (v_L) และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์สมมูล (v_C) ของการทำงานในโหมด ③ และ ④ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v_R = \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2'}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] R \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} v_L &= \left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2' - 4\alpha LI}{2} \right) e^{-\alpha t} \cos \omega_2 t \\ &+ \left(\frac{(\alpha/2)(2V + V_1 - V_2 - V_1' + V_2') + LI(\alpha^2 - \omega_2^2)}{\omega_2} \right) e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$v_C = \frac{(-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2')}{2LC(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_2 t - \frac{\alpha}{\omega_2} e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t \right] + \frac{I}{C\omega_2} e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t + V \quad (4.12)$$

โดยที่

$$\omega_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC_{ds}} \right) - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}$$

$$A_1 = \frac{\left[RC_{ds} (V_1 - V_2 + V_1' - V_2') (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2LI (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2\alpha (V + V_1 - V_2) \right]}{4\omega_2 L}$$

$$B_1 = \frac{\left[(-C_{ds}/C)(V_1 - V_2 + V_1' - V_2') - 2(V + V_1 - V_2) \right]}{4L}$$

$$D_1 = \frac{(C_{ds}/C)(V_1 - V_2 + V_1' - V_2') + 2(V + V_1 - V_2)}{4L}$$

I คือค่าเริ่มต้นของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

V คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

V_1 คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C_1

V_1' คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C_1'

V_2 คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C_2

V_2' คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C_2'

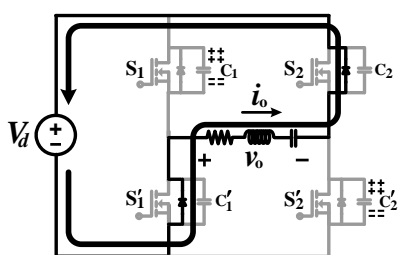
การทำงานของวงจรในโหมด ③ จะมีการขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุของสวิทช์ทั้งสองกิ่งของอินเวอร์เตอร์พร้อมกันโดยขนถ่ายประจุจาก C_2 ไปยัง C_2' ในกิ่งที่สองและขนถ่ายประจุจาก C_1' ไปยัง C_1 ในกิ่งที่หนึ่ง ส่วนการทำงานของวงจรในโหมด ④ จะเกิดการขนถ่ายประจุกลับของตัวเก็บประจุของสวิทช์ทั้งสองกิ่ง ส่งผลทำให้ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของสวิทช์แต่ละตัวของการทำงานทั้งสองโหมดมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$v_{C_1} = \frac{-1}{C_1(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] + V_1$$

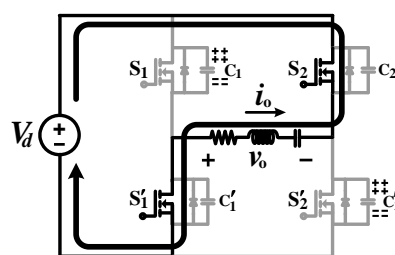
$$v_{C_1'} = \frac{1}{C_1'(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] + V_1'$$

$$v_{C_2} = \frac{1}{C_2(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] + V_2$$

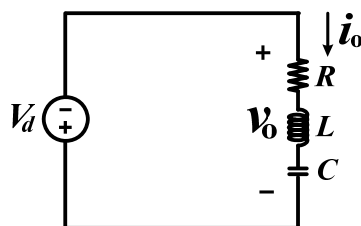
$$v_{C_2'} = \frac{-1}{C_2'(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] + V_2'$$



(ก) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ①



(ข) วงจรแสดงการทำงานในโหมด ②



(ค) วงจรสมมูลของการทำงานในโหมด ① และ ②

รูปที่ 4.13 วงจรแสดงการทำงานในโหมด ① และ ② พร้อมทั้งวงจรสมมูล

วงจรแสดงการทำงานและวงจรสมมูลขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานโหมด ① และ ② ในรูปที่ 4.13 สามารถวิเคราะห์หาสมการกระแสเอาต์พุตได้ดังสมการ

$$i_o = e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{-V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] \quad (4.14)$$

แรงดันเอาต์พุต (v_o) ของวงจรขณะทำงานในโหมด ① และ ② นี้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันคร่อม R L และ C สมมูลของวงจรเรโซแนนซ์ที่อนุกรมหรือเท่ากับค่าลบของแรงดันดีซีอินพุต (V_d) ดังสมการ

$$v_o = v_R + v_L + v_C = -V_d \quad (4.15)$$

โดยที่แรงดันคร่อมตัวต้านทานสมมูลของโหลด (v_R) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์สมมูล (v_L) และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์สมมูล (v_C) ของการทำงานในโหมด ① และ ② นี้สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$v_R = e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{-V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] R \quad (4.16)$$

$$v_L = (-V_d - V - 2\alpha LI) e^{-\alpha t} \cos \omega_1 t + \left(\frac{\alpha(V_d + V) + LI(\alpha^2 - \omega_1^2)}{\omega_1} \right) e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t \quad (4.17)$$

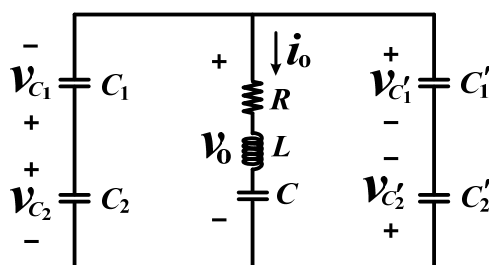
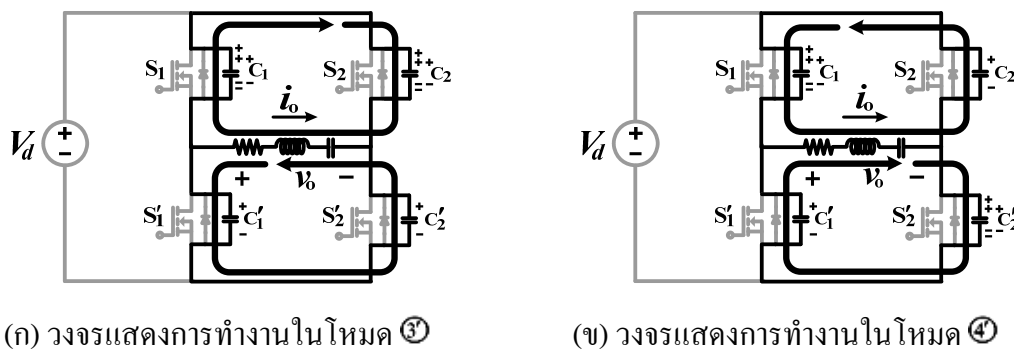
$$v_C = \frac{(-V_d - V)}{LC(\alpha^2 + \omega_1^2)} \left[1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_1 t - \frac{\alpha}{\omega_1} e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t \right] + \frac{I}{C\omega_1} e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t + V \quad (4.18)$$

สำหรับการทำงานของวงจรในโหมด ① และ ② นี้จะไม่มีกรณถ่ายประจุเกิดขึ้นระหว่างตัวเก็บประจุของสวิตช์ทั้ง 4 ตัวทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของสวิตช์แต่ละตัวมีค่าคงที่ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{C_1} &= V_d \\ v_{C_1'} &= 0 \\ v_{C_2} &= 0 \\ v_{C_2'} &= V_d \end{aligned}$$

จากวงจรแสดงการทำงานของโหมด ③ และ ④ ในรูปที่ 4.14(ก) และ 4.14(ข) ตามลำดับ ซึ่งมีวงจรสมมูลของทั้งสองโหมดเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.14(ค) สามารถวิเคราะห์หาค่าสมการกระแสเอาท์พุท (i_o) ขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด ③ และ ④ นี้ได้ดังสมการ

$$i_o = \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2'}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.14 วงจรแสดงการทำงานในโหมด ③ และ ④ พร้อมทั้งวงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.14(ค) สามารถวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต (v_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมด ③ และ ④ นี้ได้ดังสมการ

$$v_o = v_{C'_1} - v_{C'_2} = \left(\frac{C'_1 + C'_2}{C'_1 C'_2} \right) \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega_2^2} \right) \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] + (V'_1 - V'_2) \quad (4.20)$$

และยังสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุต (v_o) ขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด ③ และ ④ เดียวกันนี้ได้จากผลรวมของแรงดันคร่อม R L และ C สมมูลของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมของโหลดดังสมการ

$$v_o = v_R + v_L + v_C \quad (4.21)$$

โดยที่แรงดันคร่อมตัวต้านทานสมมูลของโหลด (v_R) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์สมมูล (v_L) และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์สมมูล (v_C) ของการทำงานในโหมด ③ และ ④ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v_R = \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2'}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] R \quad (4.22)$$

$$v_L = \left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2' - 4\alpha LI}{2} \right) e^{-\alpha t} \cos \omega_2 t \quad (4.23)$$

$$+ \left(\frac{(\alpha/2)(2V + V_1 - V_2 - V_1' + V_2') + LI(\alpha^2 - \omega_2^2)}{\omega_2} \right) e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t$$

$$v_C = \frac{(-2V - V_1 + V_2 + V_1' - V_2')}{2LC(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_2 t - \frac{\alpha}{\omega_2} e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t \right] \quad (4.24)$$

$$+ \frac{I}{C\omega_2} e^{-\alpha t} \sin \omega_2 t + V$$

โดยที่

$$A_2 = \frac{\left[RC_{ds} (V_2' - V_1' + V_2 - V_1)(\alpha^2 + \omega_2^2) - 2LI(\alpha^2 + \omega_2^2) - 2\alpha(V + V_2' - V_1') \right]}{4\omega_2 L}$$

$$\left[-\alpha(C_{ds}/C)(V_2' - V_1' + V_2 - V_1) - \alpha C_{ds} L(V_2' - V_1' + V_2 - V_1)(\alpha^2 + \omega_2^2) \right]$$

$$B_2 = \frac{\left[(-C_{ds}/C)(V_2' - V_1' + V_2 - V_1) - 2(V + V_2' - V_1') \right]}{4L}$$

$$\left[+C_{ds} L(V_2' - V_1' + V_2 - V_1)(\alpha^2 + \omega_2^2) \right]$$

$$D_2 = \frac{(C_{ds}/C)(V_2' - V_1' + V_2 + V_1) + 2(V - V_2' - V_1')}{4L}$$

การทำงานของวงจรในโหมด ③ จะมีการขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุของสวิทช์ทั้งสองกิ่งของอินเวอร์เตอร์พร้อมกัน โดยขนถ่ายประจุจาก C_2' ไปยัง C_2 ในกิ่งที่สองและขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_1' ในกิ่งที่หนึ่ง ส่วนการทำงานของวงจรในโหมด ④ จะเกิดการขนถ่ายประจุกลับของตัวเก็บประจุของสวิทช์ทั้งสองกิ่ง ส่งผลทำให้ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของสวิทช์แต่ละตัวของการทำงานในทั้งสองโหมดนี้มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$v_{C_1} = \frac{-1}{C_1(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] + V_1$$

$$v_{C_1'} = \frac{1}{C_1'(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] + V_1'$$

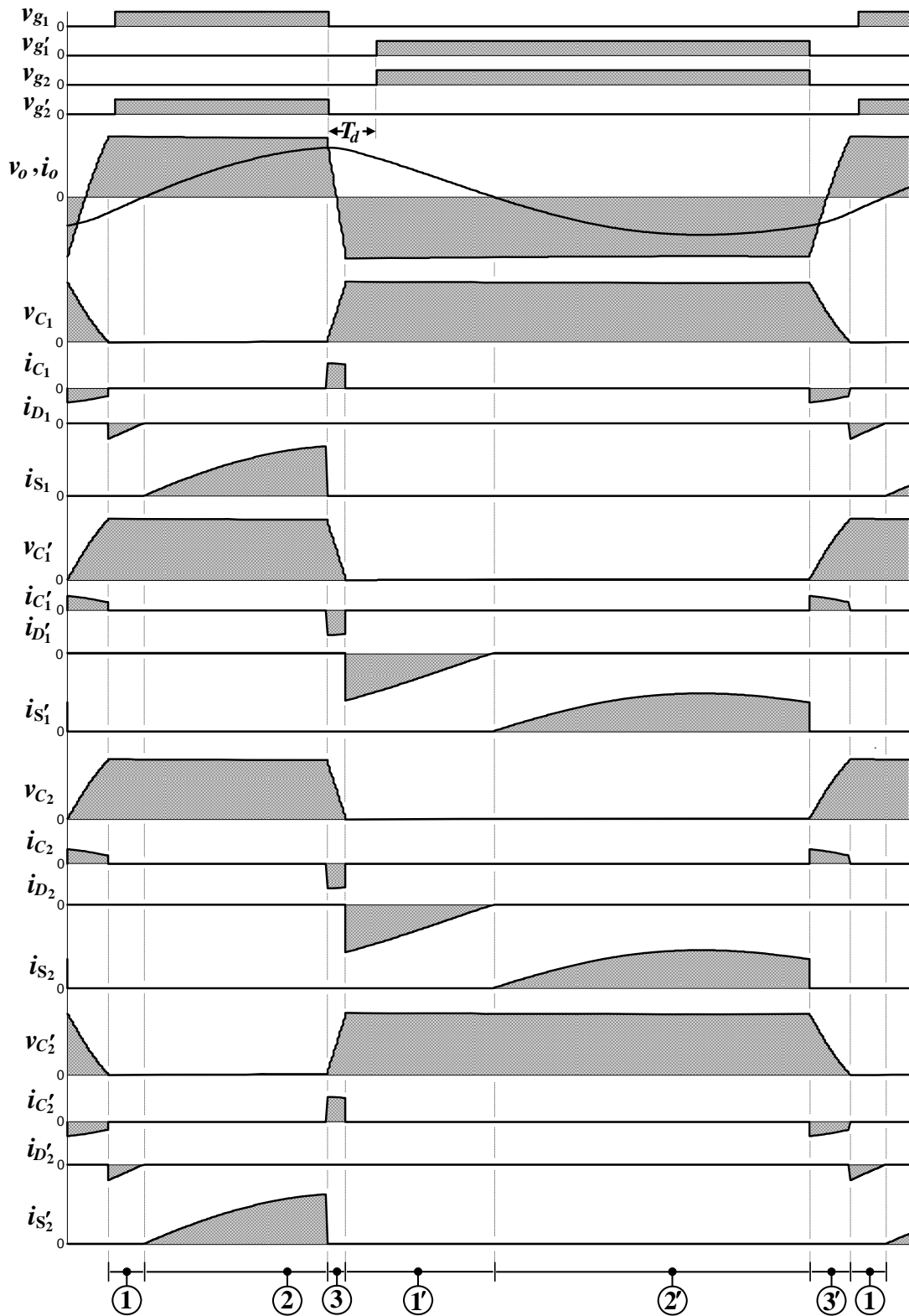
$$v_{C_2} = \frac{1}{C_2(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] + V_2$$

$$v_{C_2'} = \frac{-1}{C_2'(\alpha^2 + \omega_2^2)} \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] + V_2'$$

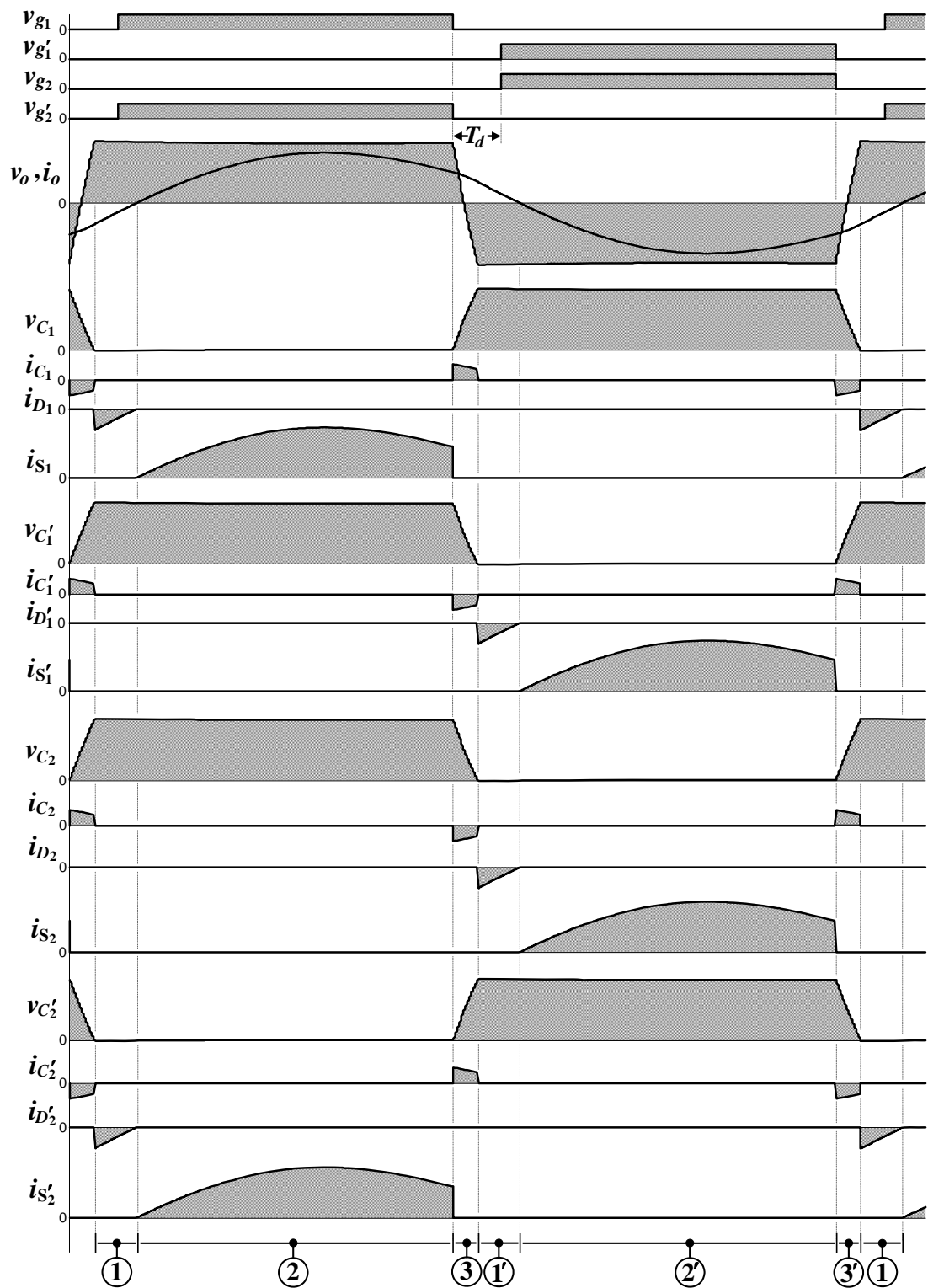
4.3 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS

จากสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดการทำงานภายในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณและพล็อตคลื่นแรงดันและกระแสเหล่านี้ได้ โดยที่คลื่นแรงดันและกระแสทั้งหมดนี้สอดคล้องกับข้ออ้างอิงของแรงดันและทิศทางอ้างอิงของกระแสที่กำหนดไว้ในวงจรรูปที่ 4.2 สำหรับการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรจากการคำนวณพร้อมทั้งสัญญาณควบคุมเกทของสวิตช์มอสเฟตแต่ละตัวได้ดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 สำหรับกรณี $D < 0.5$, $D = 0.5$ และ $D > 0.5$ ตามลำดับ จากลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรจะเห็นได้ว่าการที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ได้นั้นจะต้องควบคุมให้คลื่นกระแสเอาต์พุตล่าหลังขอบหน้าของคลื่นแรงดันเอาต์พุตมากเพียงพอที่จะทำให้การขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์สของสวิตช์มอสเฟตในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์เสร็จสมบูรณ์ก่อนที่คลื่นกระแสเอาต์พุตจะกลับทิศทางและมีเวลาเหลือให้ไดโอดได้นำกระแสก่อนการเริ่มนำกระแสของสวิตช์มอสเฟต นอกจากนี้ค่าเดดไทม์ (T_d) ของสัญญาณควบคุมเกทก็ต้องมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้การขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์เสร็จสมบูรณ์ก่อนที่สัญญาณควบคุมเกทจะมาถึง

การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ NON-ZVS สามารถแสดงคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรจากการคำนวณพร้อมทั้งสัญญาณควบคุมเกทของสวิตช์แต่ละตัวได้ดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 สำหรับกรณี $D < 0.5$, $D = 0.5$ และ $D > 0.5$ ตามลำดับ ซึ่งการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ NON-ZVS นี้จะเห็นว่าถึงแม้คลื่นกระแสเอาต์พุตจะล่าหลังขอบหน้าของคลื่นแรงดันเอาต์พุตแล้วก็ตาม แต่เวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้การขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์ทำได้เสร็จสมบูรณ์ก่อนการกลับทิศทางของคลื่นกระแสเอาต์พุต ในกรณีนี้ถึงแม้ว่าค่าเดดไทม์ของสัญญาณควบคุมเกทจะมีค่าเหมาะสมก็ไม่สามารถทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ได้

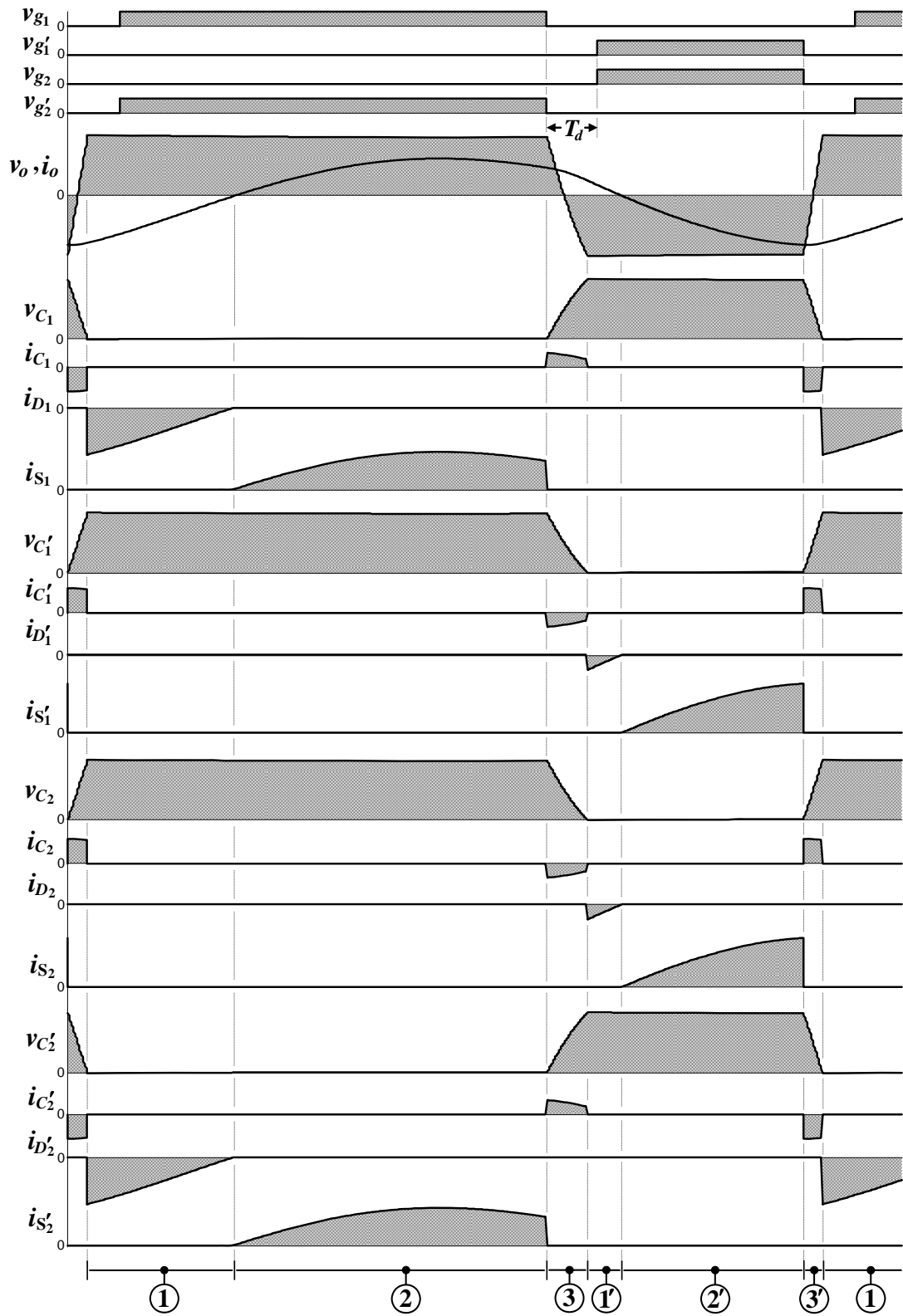


รูปที่ 4.15 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์
ขณะทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ ($D = 0.35$)

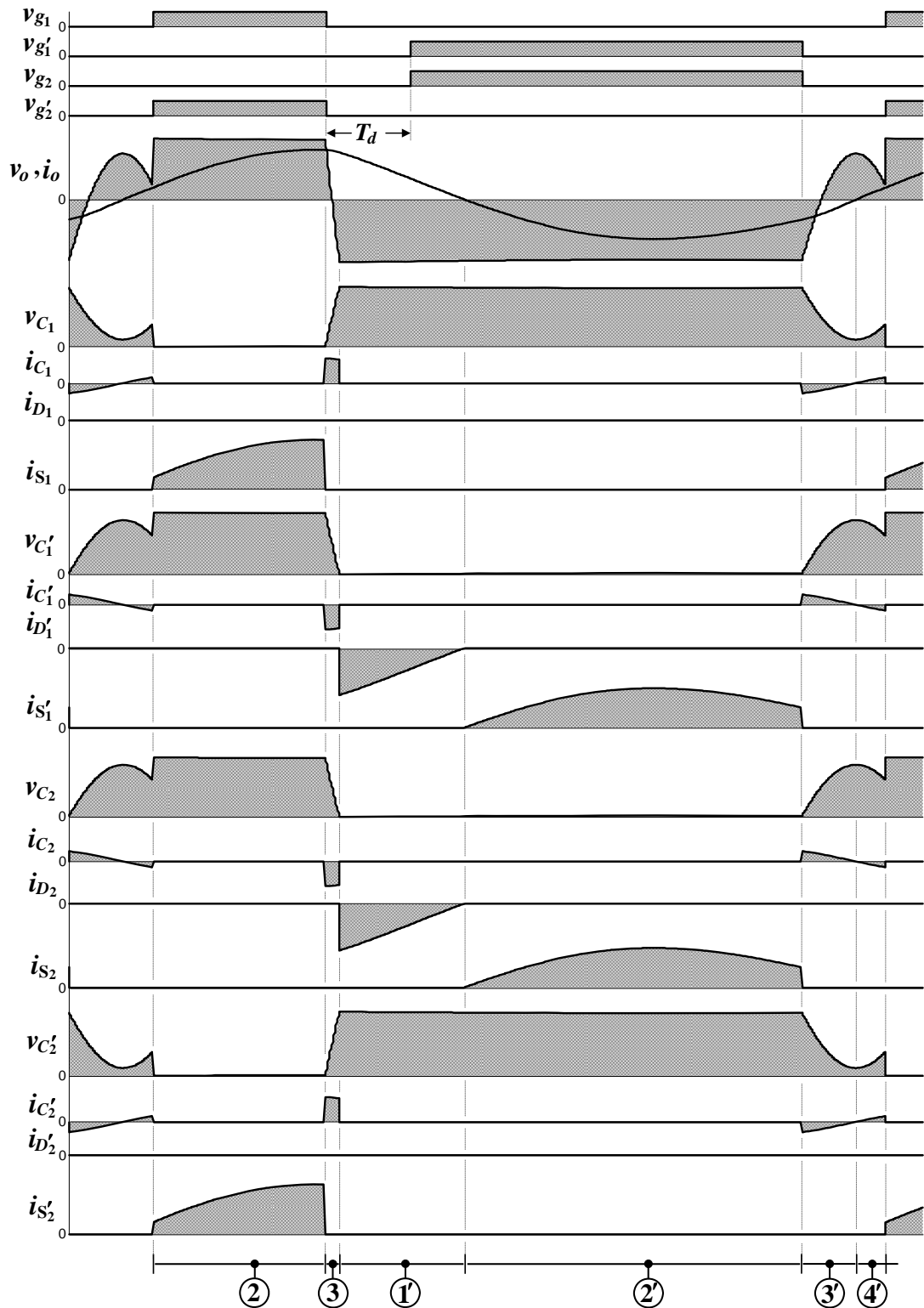


รูปที่ 4.16 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ขณะทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D = 0.5$

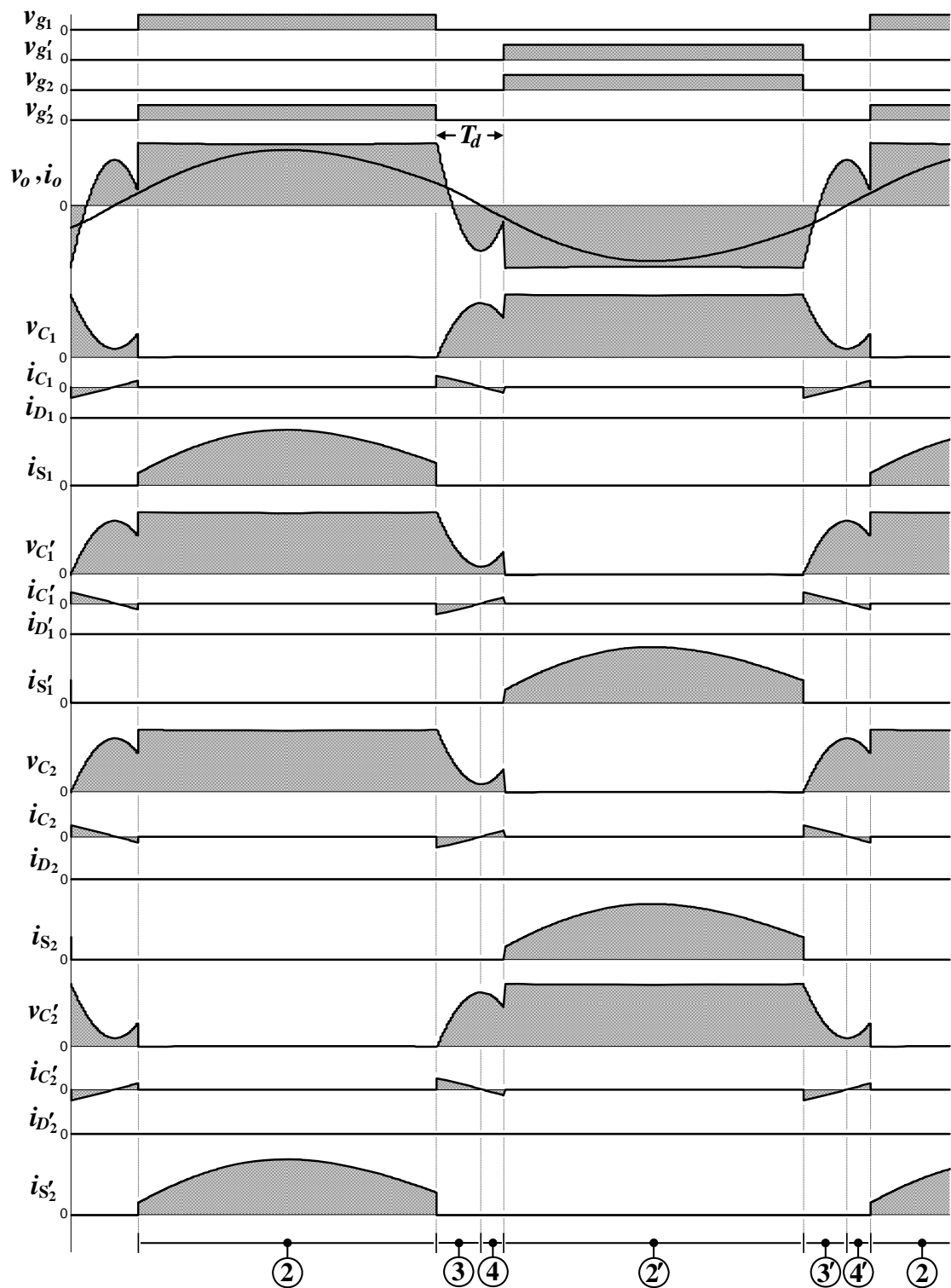


รูปที่ 4.17 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์
ขณะทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ ($D = 0.65$)



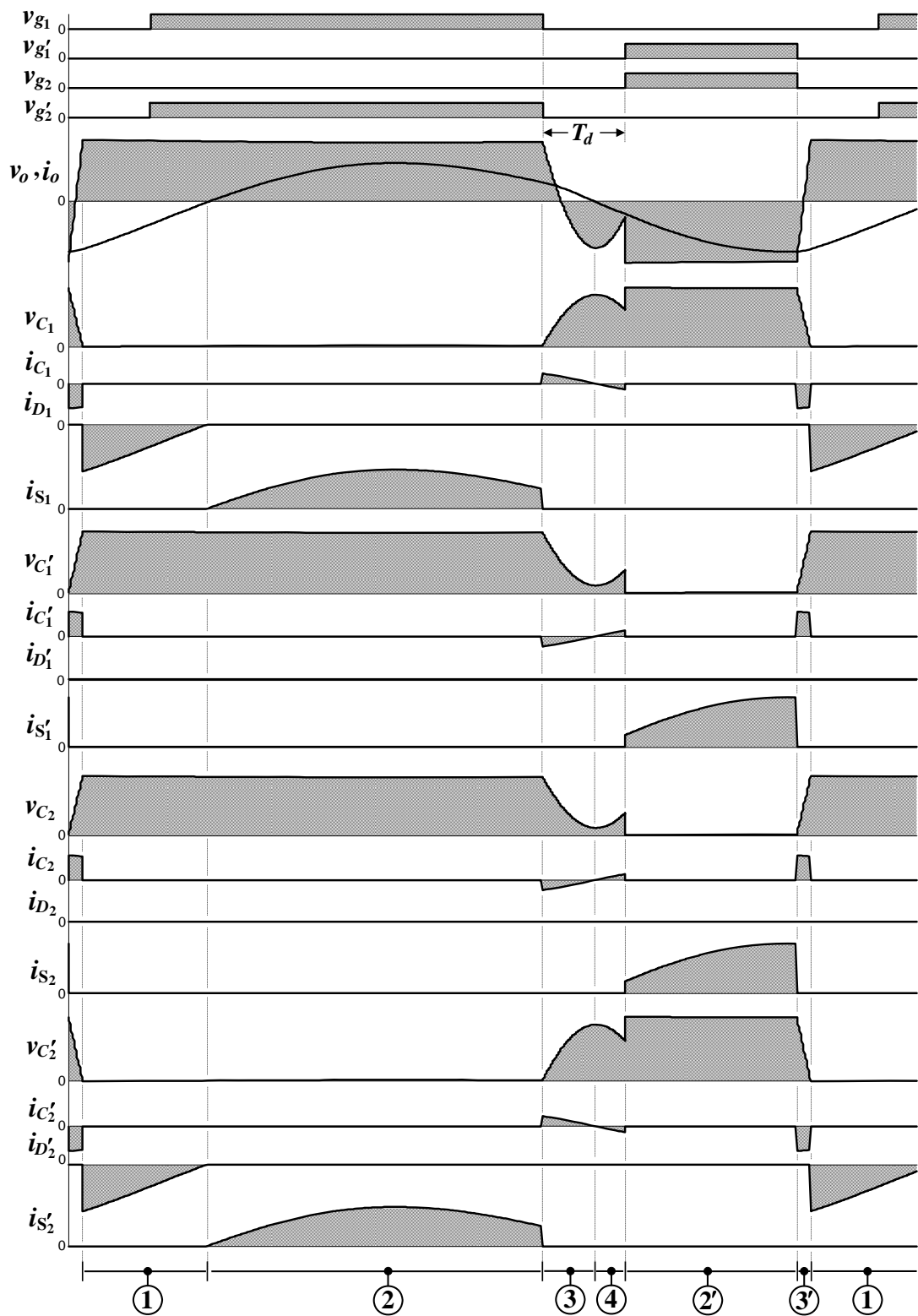
รูปที่ 4.18 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ขณะทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ ($D = 0.35$)



รูปที่ 4.19 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ขณะทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D = 0.5$



รูปที่ 4.20 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ขณะทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ ($D = 0.65$)

4.4 สรุป

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS โดยมีการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลเพื่อใช้ในการงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงมีประเด็นสำคัญหลักที่สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ขบวนการขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อสวิทช์ทั้งคู่หยุดนำกระแสและมีโอกาสเกิดขึ้นได้สองสภาวะคือ (1) การขนถ่ายประจุได้สำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึงซึ่งเป็นกรณีที่สวิทช์ทำงานถูกต้อง แรงดันคร่อมสวิทช์มอสเฟตตัวที่จะเริ่มนำกระแสในลำดับถัดไปมีค่าเท่ากับศูนย์ (ZVS) (2) การขนถ่ายประจุไม่สำเร็จก่อนสัญญาณเกตมาถึงซึ่งเป็นกรณีที่สวิทช์ทำงานไม่ถูกต้อง ยังคงมีแรงดันคร่อมสวิทช์มอสเฟตตัวที่จะเริ่มนำกระแสในลำดับถัดไป (NON-ZVS)

(2) โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์นี้ทั้งภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS ตลอดย่านการปรับค่าดิวิตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะมีทั้งหมด 6 โหมดที่แตกต่างกันในสองย่านคือ $D < 0.5$ และ $D > 0.5$ กับอีก 1 จุดคือ $D = 0.5$

(3) การที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ได้นั้นจะต้องควบคุมให้คลื่นกระแสเอาต์พุตล่าหลังขอบหน้าของคลื่นแรงดันเอาต์พุตมากเพียงพอที่จะทำให้การขนถ่ายประจุระหว่างตัวเก็บประจุเดรน-ซอร์สของสวิทช์มอสเฟตในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์เสร็จสมบูรณ์ก่อนที่คลื่นกระแสเอาต์พุตจะกลับทิศทางและมีเวลาเหลือให้ไดโอดได้นำกระแสก่อนการเริ่มนำกระแสของสวิทช์มอสเฟต

(4) ค่าเดดไทม์ (T_d) ของสัญญาณควบคุมเกทก็จะต้องมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้การขนถ่ายประจุในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์เสร็จสมบูรณ์ก่อนที่สัญญาณควบคุมเกทจะมาถึง ถ้าค่าเดดไทม์น้อยเกินไปการขนถ่ายประจุยังไม่เสร็จสมบูรณ์ เมื่อมีสัญญาณมาถึงทำให้สวิทช์เริ่มนำกระแสขณะที่ยังคงมีแรงดันคร่อมสวิทช์ค่าหนึ่งหรือสวิทช์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS นั่นเองและถ้าค่าเดดไทม์มากเกินไปจนทำให้สัญญาณมาถึงหลังจากผ่านโหมครีเจนเนอเรทีฟไปแล้วทำให้มีการขนถ่ายประจุกลับทิศทาง ส่งผลให้สวิทช์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS เช่นกัน