บทที่ 5

รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

5.1 บทนำ

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการทดลองหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์ตัวต้นแบบแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการจับดูรูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันที่ใช้จุดชนวน thyristor เพื่อศึกษาถึงการคอมมิวเตชั่น

รูป 5.1 เป็นวงจรของขดลวดอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์ตัวต้นแบบ ในการทำงาน thyristor P,P' จะถูกจุดชนวนพร้อมกัน ทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะไหลจาก D ไป C ถ้า X มีศักย์เป็นบวก และกระแสจะไหลจาก B ไป A ถ้า Y มีศักย์เป็นบวก กระแสทั้งสองจะมีทิศทางเดียวกันคือจากด้านล่างไปสู่ด้านบน ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นในทิศทางหนึ่งเป็นผลให้ขดลวดสนามแม่เหล็กหมุน และกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะต้องหยุดไหลเพื่อกลับทิศทางก่อนที่จะเข้าไปในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้าม หลังจากที่ขดลวดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไป 180 electrical degree thyristor N,N' จะถูกจุดชนวนพร้อมกันเพื่อทำให้กระแสไหลจาก A ไป B ถ้า X มีศักย์เป็นบวก และจาก C ไป D ถ้า Y มีศักย์เป็นบวก จึงจะทำให้ทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็ก

ในการจับดูรูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ ใช้ electromagnetic oscillograph จับรูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ W,Z เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันที่ใช้จุดชนวน thyristor P,P' และสัญญาณแรงดันที่ใช้จุดชนวน thyristor N,N'

5.2 การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูง

ในการศึกษาเกี่ยวกับการคอมมิวเตชั่นของ thyristor นั้น ทำโดยใช้มอเตอร์มาหมุนมอเตอร์ตัวต้นแบบโดยที่ไม่มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก ที่ความเร็วต่ำ และความเร็วสูง จับดูรูปคลื่นดังแสดงในรูป 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ แล้วหมุนที่ความเร็วสูงโดยมีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กดังรูป 5.4

รูป 5.2 เป็นรูปคลื่นในตอนที่ไม่มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กและ trigger angle = $+40^{\circ}$ ขณะที่ความเร็ว 600 rpm ที่จุด A เมื่อมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor P,P' จะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ W และต่อมาหลังจากขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไป

180 electrical degree คือที่จุด B จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor N,N' ทำให้กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ W ไหลในทิศทางตรงข้าม จะเห็นว่ากระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ W ได้หยุดไหลก่อนที่จะถึงจุด B ทั้งนี้เนื่องจากกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟเป็นคลื่นรูปไซน์ thyristor P,P' จึงถูกทำให้หยุดนำกระแสเมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่าต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ จากจุด B เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไป180 electrical degree คือที่จุด C จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor P,P' ทำให้มีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ Z ในทิศทางตรงข้ามกับที่จุด B แต่ทิศทางเดียวกับที่จุด A จึงเป็นผลให้ทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็กอยู่เสมอ จะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วต่ำจะเป็นแบบ natural commutation กล่าวคือ thyristor จะถูกทำให้หยุดนำกระแสเนื่องจากกระแสสลับที่มาจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรอาร์เมเจอร์เป็นคลื่นรูปไซน์ เมื่อกระแสที่ไหลผ่าน thyristor มีค่าต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ ก็จะทำให้ thyristor หยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้าม

รูป 5.3 เป็นรูปคลื่นในขณะที่ความเร็วเป็น 1060 rpm และ trigger angle= +40° ที่จุด M จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor N,N' ทำให้กระแสไหลในขดลวด Z ต่อมาเมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไป 180electrical degree คือที่จุด N จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor P,P' เป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวด W ในทิศทางตรงข้ามกับที่จุด M และเมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไปอีก 180 electrical degree คือที่จุด O จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor N,N' เพื่อทำให้กระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ในทิศทางตรงข้ามกับที่จุด N แต่จากรูปจะเห็นว่าเมื่อมาถึงจุด O ปรากฏว่ากระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ W ยังไม่หยุดไหลเนื่องจาก thyristor ยังไม่สามารถหยุดนำกระแสได้เพราะว่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของขดลวดสนามแม่เหล็กสูง จึงทำให้กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์ยังไม่ทันจะลดต่ำลงกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ของ thyristor เพื่อทำให้ thyristor หยุดนำกระแสก่อนที่จะถึงจุด O ซึ่งขดลวดอาร์เมเจอร์จะไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดขั้วตรงข้าม จะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วสูงไม่สามารถคอมมิวเตชั่นแบบ natural commutation ได้

รูป 5.4 เป็นรูปคลื่นที่ความเร็ว 1500 rpm และมุม trigger angle = +40° แต่มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก 1.2A. จะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ thyristor สามารถหยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้าม การคอมมิวเตชั่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ทั้ง ๆที่ความเร็วสูง เพราะเนื่องจากแรงดันย้อนกลับ(back emf) ที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งแรงดันย้อนกลับ(back emf) จะมีทิศทางย้อนกลับกันกับทิศทางของแรงดันสลับที่จ่ายให้แก่วงจรอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะช่วยให้ thyristor หยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้าม ทำให้ทิศทางของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์สัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็กอยู่เสมอ การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วสูงจึงเป็นแบบ forced commutation โดยอาศัยแรงดันย้อนกลับ (back emf) ในการหยุดนำกระแสของ thyristor

5.3 <u>รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์</u>

ในหัวข้อนี้เป็นการจับดูรูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันที่ใช้จุดชนวน โดยจับดูรูปคลื่นที่มุม trigger angle และค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กัน

รูป 5.5 ถึง 5.7 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle = +40° และค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A. มีความเร็ว 400, 1000, 1500 rpm ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ทุก ๆ ความเร็ว ที่ความเร็วต่ำซึ่งการคอมมิวเตชั่นเป็นแบบ natural commutation ที่มุม trigger angle = +40° นี้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่นำกระแสจะอยู่ห่างจากขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามมากทำให้มีเวลามากพอที่กระแสที่ไหลผ่าน thyristor (เป็นกระแสที่มาจากแหล่งจ่ายไฟสลับที่เป็นคลื่นรูปไซน์ ทิศทางการไหลของกระแสจะกลับทิศทางทุก ๆ 10 msec.) จะมีโอกาสลดลงต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์ได้ เป็นผลให้ thyristor สามารถหยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามจะเข้ามาหา การคอมมิวเตชั่นจึงเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ส่วนที่ความเร็วสูงซึ่งการคอมมิวเตชั่นไม่สามารถจะเป็นแบบ natural commutation ได้ เนื่องจากขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามจะเคลื่อนที่เข้ามาหาขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วยความเร็วสูงทำให้กระแสที่ไหลผ่าน thyristor ไม่ทันมีโอกาสที่จะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าโฮลดิ้งเคอร์เรนท์

ดังนั้นในการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วสูงจึงต้องเป็นแบบ forced commutation โดยอาศัยแรงดันย้อนกลับ (back emf) ทำให้ thyristor สามารถหยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามจะเข้ามาหา ซึ่งจากรูป 5.7 จะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นก็เป็นไปอย่างสมบูรณ์เนื่องจากที่มุม trigger angle =+40° นี้ขดลวดอาร์เมเจอร์มีโอกาสที่จะผ่านศูนย์กลางขั้วของขั้วแม่เหล็กซึ่งมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงที่สุด แรงดันย้อนกลับที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงพอที่จะทำให้ thyristor หยุดนำกระแสได้ทันก่อนที่ขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามจะเข้ามาหา

รูป 5.8 ถึง 5.10 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle = +40° และความเร็ว 400 1000, 1500 rpm ตามลำดับเหมือนรูป 5.5 ถึง 5.7 แต่ค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กเป็น 1.2A. จากรูปจะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นสมบูรณ์ทุก ๆ ความเร็วกล่าวคือทิศทางของกระแสสัมพันธ์กับชนิดของขั้วแม่เหล็ก

รูป 5.11 ถึง 5.13 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle =+20° และความเร็ว 400 1000, 1500 rpm ตามลำดับ ค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A. ส่วนรูป 5.14 ถึง 5.16 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle =+20° และความเร็ว 400, 1000, 1500 rpm ตามลำดับ แต่ค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A. ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นก็เป็นไปอย่างสมบูรณ์ถึงแม้ว่าที่มุม trigger angle = +20° นี้ ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่นำกระแสจะอยู่ห่างจากขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามน้อยกว่าที่มุม +40° แต่การคอมมิวเตชั่นที่ความเร็วต่ำซึ่งเป็นแบบ natural commutation ก็ยังเป็นไปได้ดี เนื่องจากเวลายังมากพอที่จะทำให้ thyristor หยุดนำกระแสโดย natural commutation ได้ ส่วนที่ความเร็วสูงขดลวดอาร์เมเจอร์มีโอกาสที่ผ่านศูนย์กลางขั้วของขั้วแม่เหล็กจึงทำให้ thyristor หยุดนำกระแสโดยวิธี forced commutation ได้ดี จึงทำให้การคอมมิวเตชั่นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ทั้งที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูง

รูป 5.17 และ 5.18 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle =0° และความเร็ว 400, 1100 rpm ตามลำดับ ค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก =1.2A. ซึ่งที่มุม trigger angle =0° นี้ ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่นำกระแสจะอยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามมากจึงทำให้การคอมมิวเตชั่นส่วนใหญ่อาศัย forced commutation ซึ่งที่มุมนี้เมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์นำกระแสแล้วหลังจากขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปขดลวดไม่มีโอกาสผ่านศูนย์กลางขั้วของขั้วแม่เหล็กจึงทำให้การคอมมิวเตชั่น

จะไม่สมบูรณ์ถ้าความเร็วสูง เป็นผลให้ทำงานได้ที่ความเร็วต่ำกว่าที่มุมบวก +20°, +40° จากรูป จะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็ว 400 rpm ยังสมบูรณ์ส่วนที่ความเร็ว 1100 rpm ไม่ค่อยจะสมบูรณ์จะเห็นได้จากเวลาที่กระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์นานกว่าจะหยุดไหล

รูป 5.19 และ 5.20 เป็นรูปคลื่นที่มุม trigger angle = -10° และความเร็ว 400, 890 rpm ตามลำดับ ค่าของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A. ซึ่งที่มุม trigger angle = -10° นี้ ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่นำกระแสจะอยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้ามมากกว่าที่มุม = 0° จึงทำให้การคอมมิวเตชั่นส่วนใหญ่เป็นแบบ forced commutation และทำงานได้ที่ความเร็วต่ำกว่าที่มุม = 0° จากรูปจะเห็นว่าการคอมมิวเตชั่นที่ความเร็ว 890 rpm เริ่มจะไม่สมบูรณ์จะเห็นได้จากเวลาที่กระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์นานกว่าจะหยุดไหล

จากรูป 5.4, 5.7, 5.10, 5.13 และ 5.16 จะเห็นว่ากระแสจะไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ขดใดขดหนึ่งเพียงขดเดียวในหนึ่งช่วงเวลาแล้วจะหยุดไหลในอีกหนึ่งช่วงเวลาถัดไปโดยที่กระแสจะไหลในขดลวดอีกขดหนึ่งแทน ที่เป็นดังนี้ จะขออธิบายตามรูป 5.10 ในช่วงเวลาแรกคือที่จุด R เมื่อมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor P,P' ซึ่งเป็นขณะที่ขั้ว Y (ตามรูป 5.1) มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับ X จึงทำให้ thyristor P นำกระแส เป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวด W ในทิศทางจาก B ไป A เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไป 180 electrical degree คือที่จุด S จะมีสัญญาณแรงดันไปจุดชนวน thyristor N, N' ซึ่งในขณะที่มาถึงจุด S นี้ขั้ว Y จะกลับขั้วคือมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับ X ทั้งนี้เพราะจากจุด R มาจุด S นี้ใช้เวลา $\frac{1}{4}$ ของเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบของการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งเมื่อมอเตอร์มีความเร็ว 1500 rpm เวลาจากจุด R มาจุด S จะเท่ากับ 10 msec. ที่จุด R เป็นขณะที่มีกระแสไหลในขดลวด W ต่ำแสดงว่าขั้ว Y เพิ่งจะเริ่มเป็นขั้วบวก และต่อมาอีก 10 msec. เมื่อถึงจุด S ขั้วY ก็จะกลับขั้วเป็นขั้วลบเนื่องจาก X, Y เป็นขั้วของแรงดันสลับความถี่ 50 Hz. จึงทำให้ในขณะที่มีสัญญาณที่จุด S มาจุดชนวน thyristor N, N' นั้นขั้ว Y จะเป็นลบเป็นผลให้ thyristor N' เป็นตัวที่นำกระแส ทำให้กระแสยังคงไหลในขดลวด W แต่มีทิศทางตรงข้ามกับที่จุด R คือจาก A ไป B ต่อมาที่จุด T เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนไป 180 electrical degree ซึ่งจากจุด S มาจุด T นี้ใช้เวลา 10 msec. เหมือนกัน จึงทำให้ในขณะที่มีสัญญาณที่จุดT มาจุดชนวน

thyristor P, P' นั้นขั้ว Y จะกลับขั้วมาเป็นขั้วบวกพอดีทำให้ thyristor P นำกระแสเป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวด W แต่มีทิศทางตรงข้ามกับที่จุด S คือจาก B ไป A และจากรูปจะเห็นว่าขนาดของกระแสจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุด U แล้วหลังจากนั้นขนาดของกระแสจะลดลงเรื่อย ๆ ที่เป็นดังนี้เพราะขณะที่จุด R เป็นขณะที่ขั้ว Y เพิ่งจะเป็นบวกและต่อมาอีก 10 msec. คือที่จุด S จะเป็นขณะที่ขั้ว Y เป็นลบ แต่ขนาดของแรงดันจะมากกว่าที่จุด R เพราะความเร็วของมอเตอร์ที่อ่านได้จาก tachometer ไม่ถูกต้องจริง ๆ ซึ่งอาจจะมีความผิดพลาดได้ถึง $\pm$ 5 rpm จึงทำให้เวลาจากจุด R มาจุด S หรือจากจุด S ไปจุด T ไม่ใช่ 10 msec. จริง ๆ เป็นผลให้การจุดชนวนไม่ตรงกับขนาดของแรงดันที่เท่าเดิมเสมอ เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ขนาดของแรงดันที่มาตรงกับขณะที่มีสัญญาณไปจุดชนวนจะ shift ไปเรื่อย ๆ คือจะมีขนาดมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุด U หลังจากนั้นขนาดก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุด V ซึ่งเป็นจุดมีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P, P' แต่รูปคลื่นของแรงดันสลับได้ shift มาจนกระทั่งในขณะที่จุด V นี้ขั้ว Y จะมีศักย์เป็นลบจึงทำให้ thyristor P' นำกระแสเป็นผลให้มีกระแสไหลในขดลวด Z มีทิศทางจาก D ไป C ในเวลาต่อๆไปก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการที่กระแสไหลในขดลวด W คือกระแสจะไหลอยู่ในขดลวด Z ระยะหนึ่งและรูปคลื่นของแรงดันสลับก็จะ shift ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุด K ขั้ว Y จะกลับมาเป็นขั้วบวกอีกก็จะทำให้กระแสไหลในขดลวด W ในช่วงเวลาต่อมา

ส่วนตามรูป 5.7, 5.13 ซึ่งเป็นรูปคลื่นในขณะที่มีความเร็วของมอเตอร์ 1500 rpm เหมือนกัน จะเห็นว่ากระแสจะไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ W เพียงขดเดียว และขนาดของกระแสค่อนข้างเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์เกือบจะเท่ากับ 1500 rpm จริง ๆ จึงทำให้เมื่อมีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor P,P' ก็จะตรงกับขณะที่ขั้ว Y เป็นบวกและเมื่อมีสัญญาณไปจุดชนวน thyristor N, N' ก็จะตรงกับขณะที่ขั้ว Y เป็นลบและมีขนาดของแรงดันเกือบเท่ากัน เป็นผลให้กระแสจึงไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ W เพียงขดเดียว และจากรูปจะเห็นว่าขนาดของกระแสก็ยังไม่เท่ากันจริง ๆ แสดงว่ารูปคลื่นยังมีการ shift เล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ รูปคลื่นจะ shift ไปจนกระทั่งทำให้เมื่อมีสัญญาณมาจุดชนวน thyristor P, P'

ก็จะตรงกับขณะที่ขั้ว Y มีศักย์เป็นลบพอดี thyristor P' จะเป็นตัวนำกระแส เป็นผลให้กระแสไหลในขดลวด Z ไปอีกช่วงเวลาหนึ่งจนกระทั่งถึงอีกช่วงเวลาหนึ่งกระแสก็จะไหลในขดลวด W อีก ซึ่งจะเป็นไปในทำนองเดียวกันนี้ต่อไปเรื่อย ๆ

ส่วนตามรูปอื่นกระแสในขดลวดก็จะผลัดกันไหลระหว่างขดลวด W และขดลวดZ ซึ่งจะไหลในขดลวดใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับสภาพของขั้ว X, Y ของแรงดันสลับที่จ่ายเข้ามาทางวงจรอาร์เมเจอร์ดังได้กล่าวมาแล้ว

สรุปแล้วขีดความสามารถในการทำงานที่ความเร็วต่าง ๆ ของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับมุม trigger angle เช่นที่มุม + 40° จะสามารถทำงานได้ที่ความเร็วสูงกว่าที่มุม + 20° และที่มุม + 20° จะทำงานได้ที่ความเร็วสูงกว่ามุม 0° และ - 10° โดยที่การคอมมิวเตชั่นยังสมบูรณ์อยู่

FIG. 5.1

วงจรของขดลวดอาร์เมเจอร์

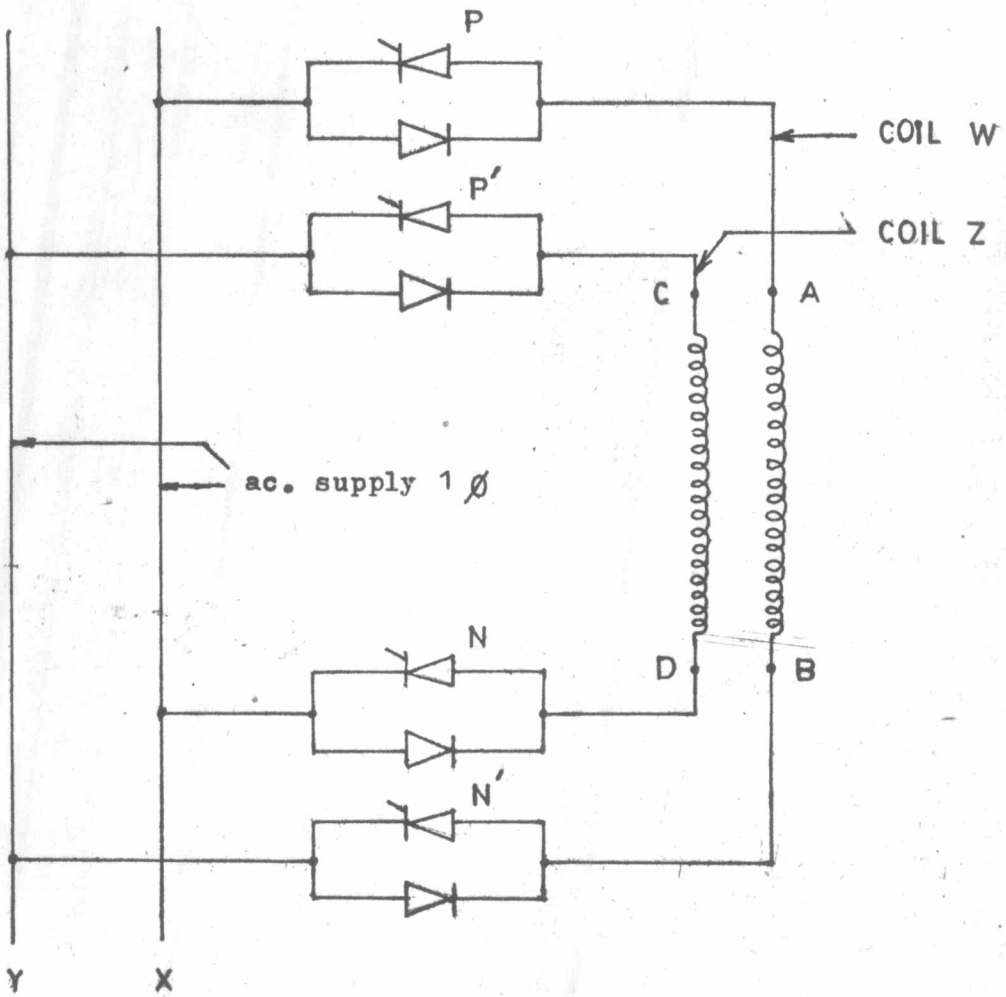
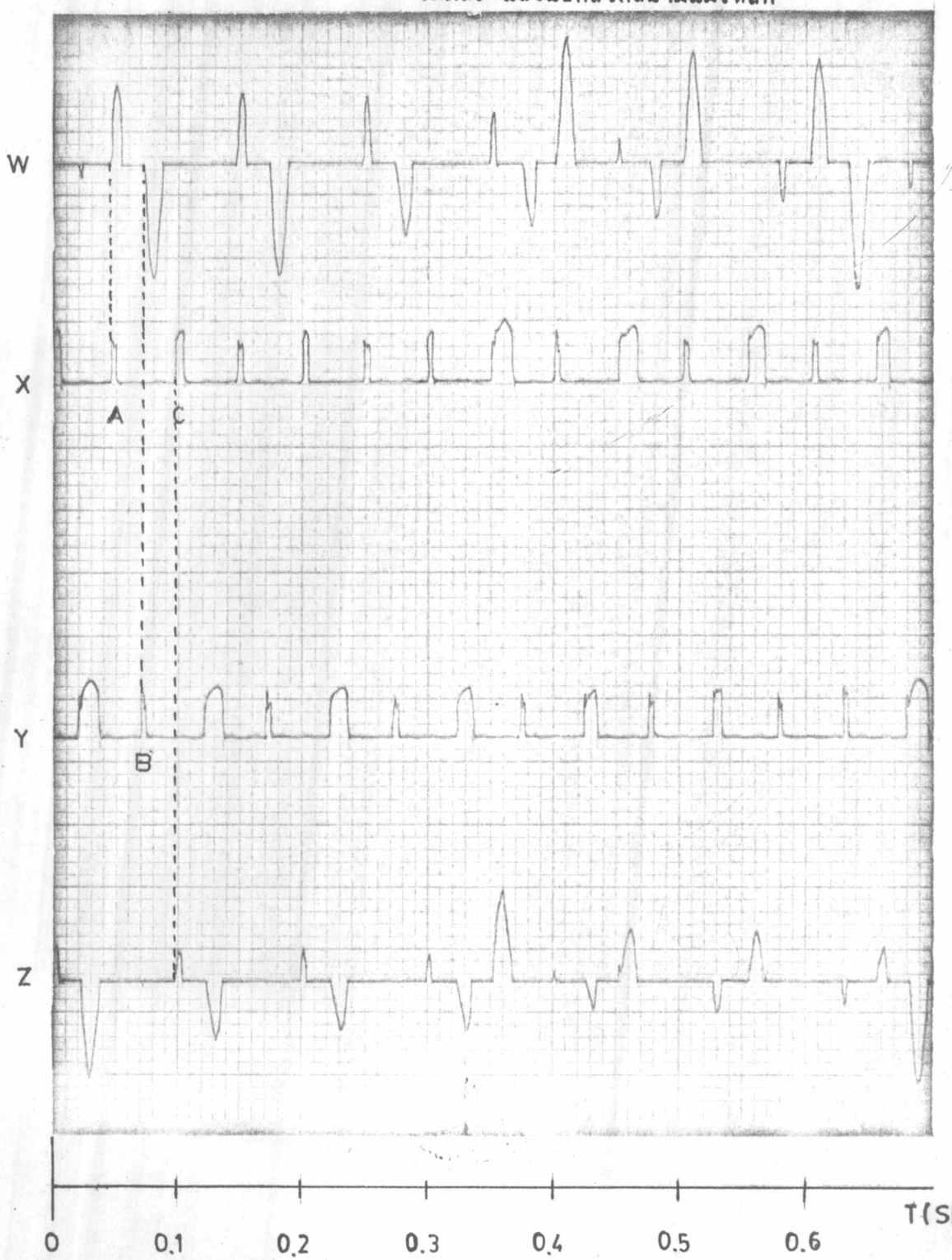


FIG. 5.2

speed 600 rpm, trigger angle = + 40°

ไม่มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

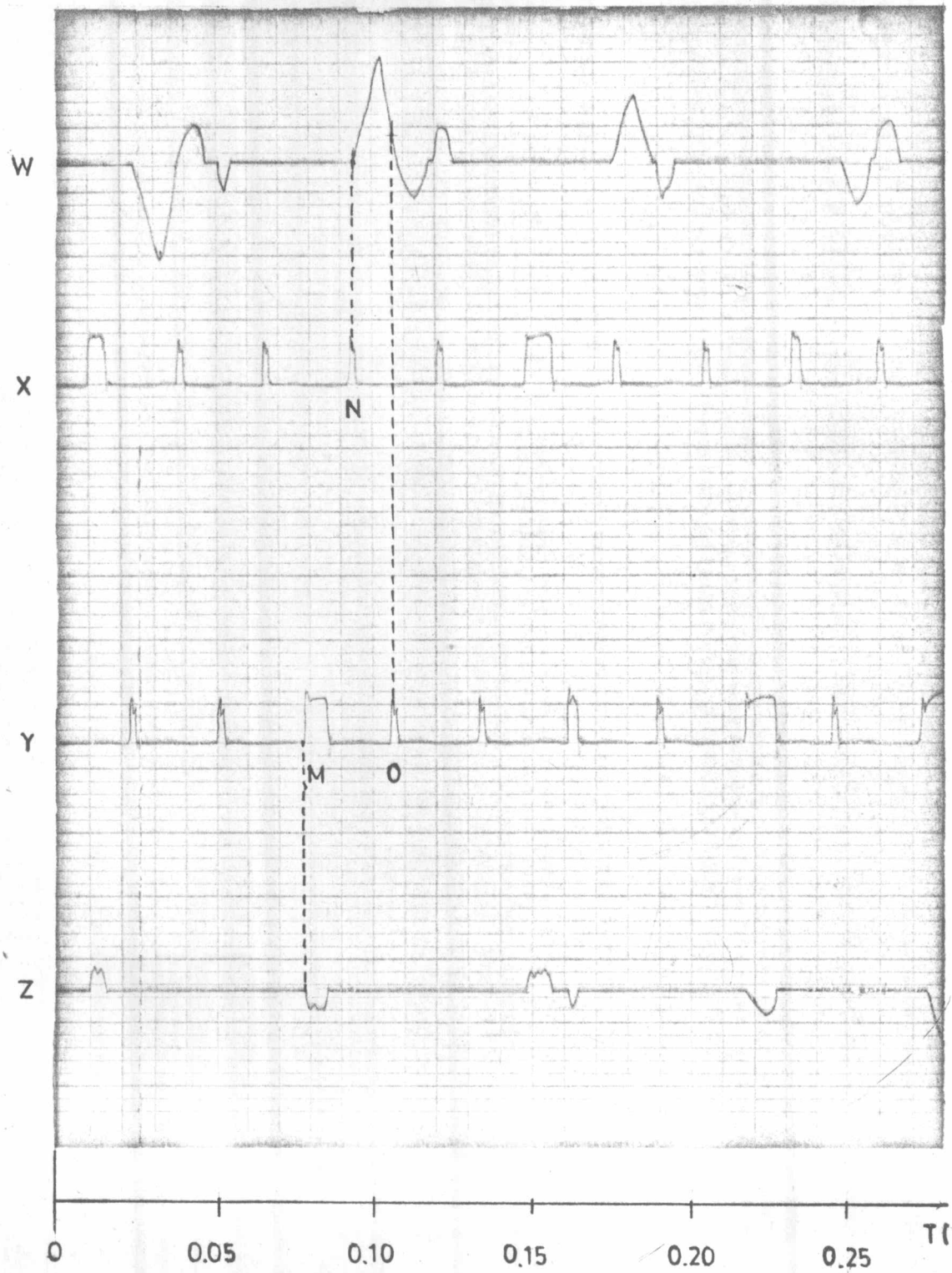
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.3

speed 1060 rpm, trigger angle = + 40°

ไม่มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.4

speed 1500 rpm, trigger angle = + 40°

มีกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.

W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

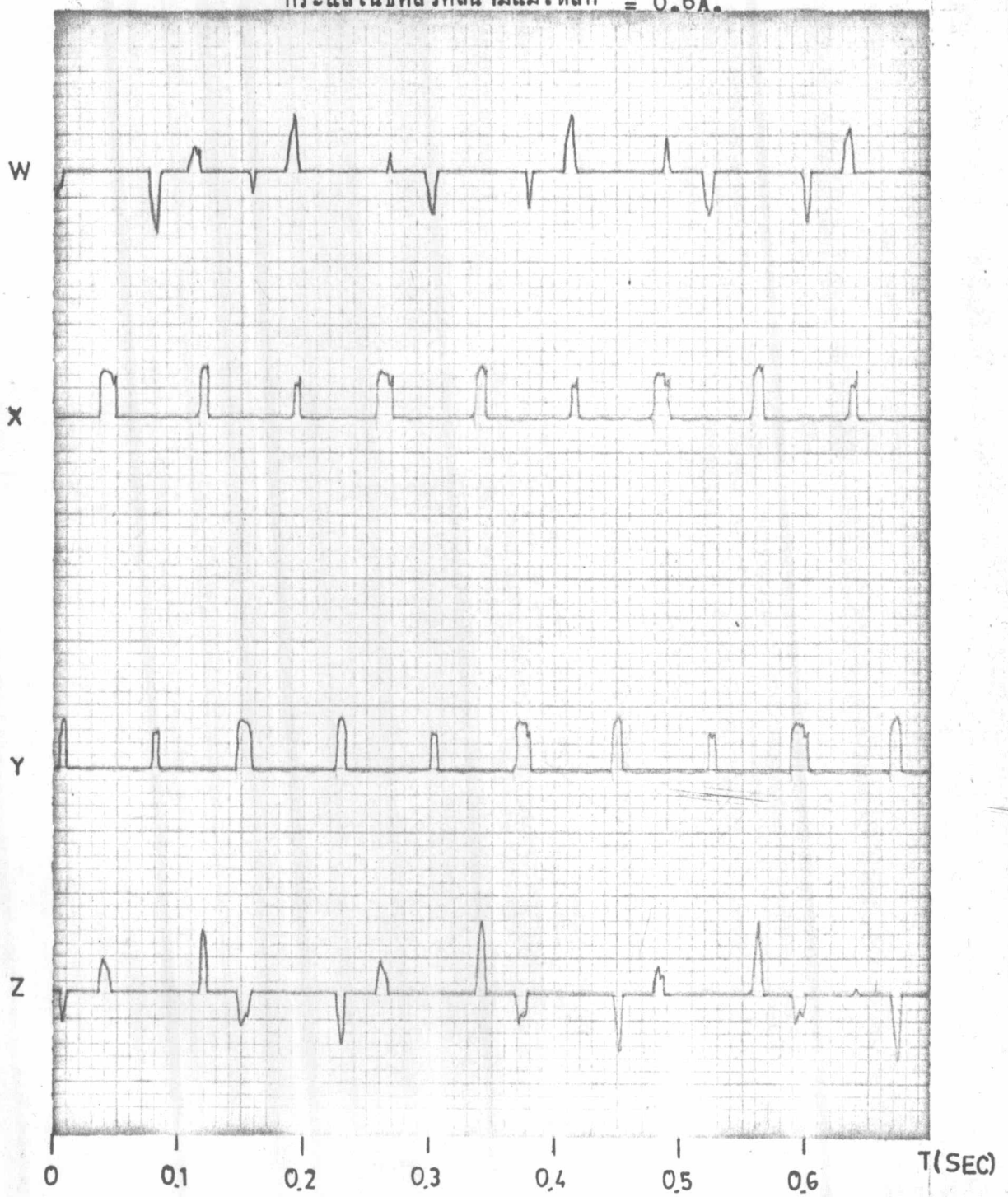
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.5

speed 400 rpm, trigger angle = + 40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

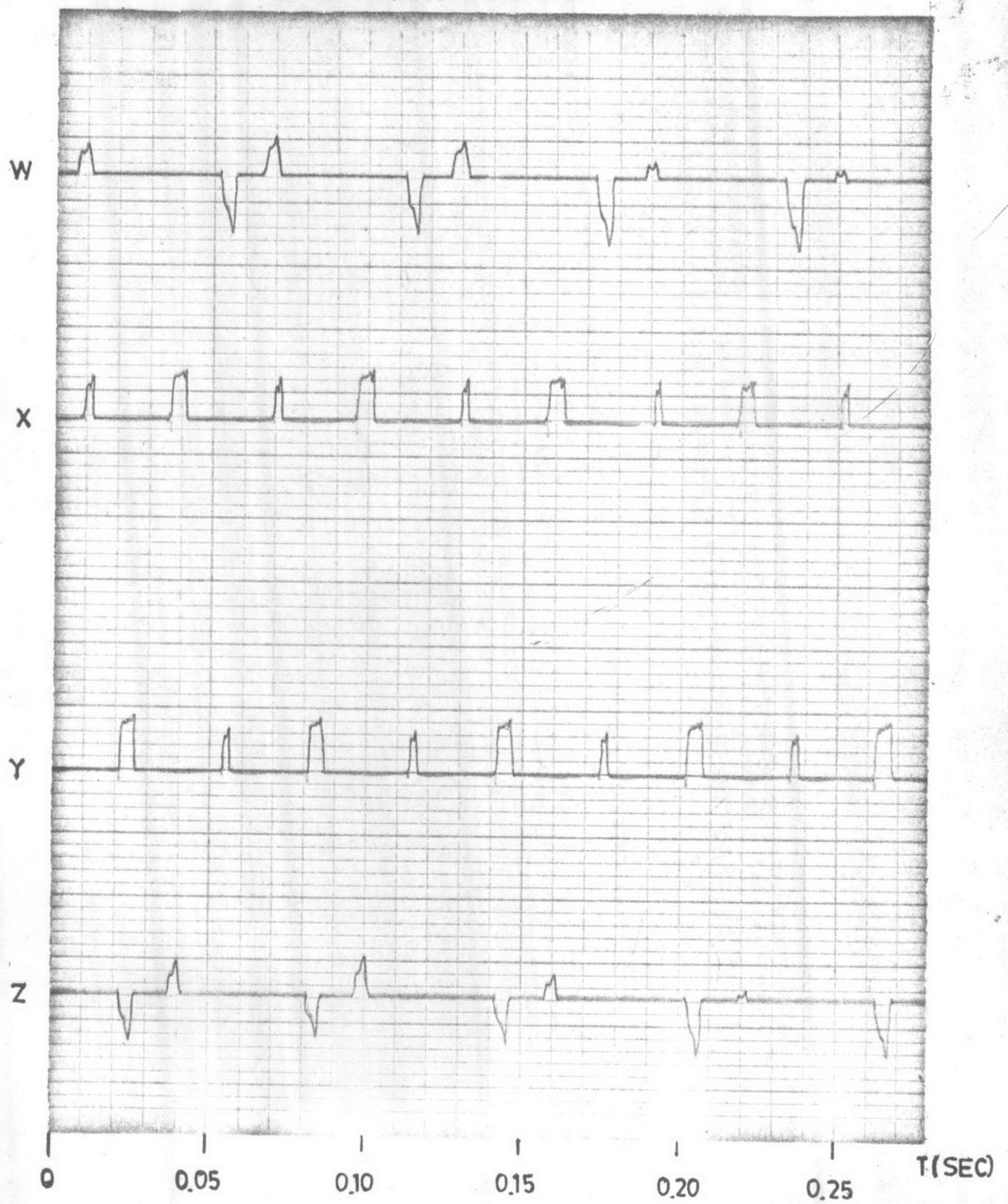
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.6

speed 1000 rpm, trigger angle = + 40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

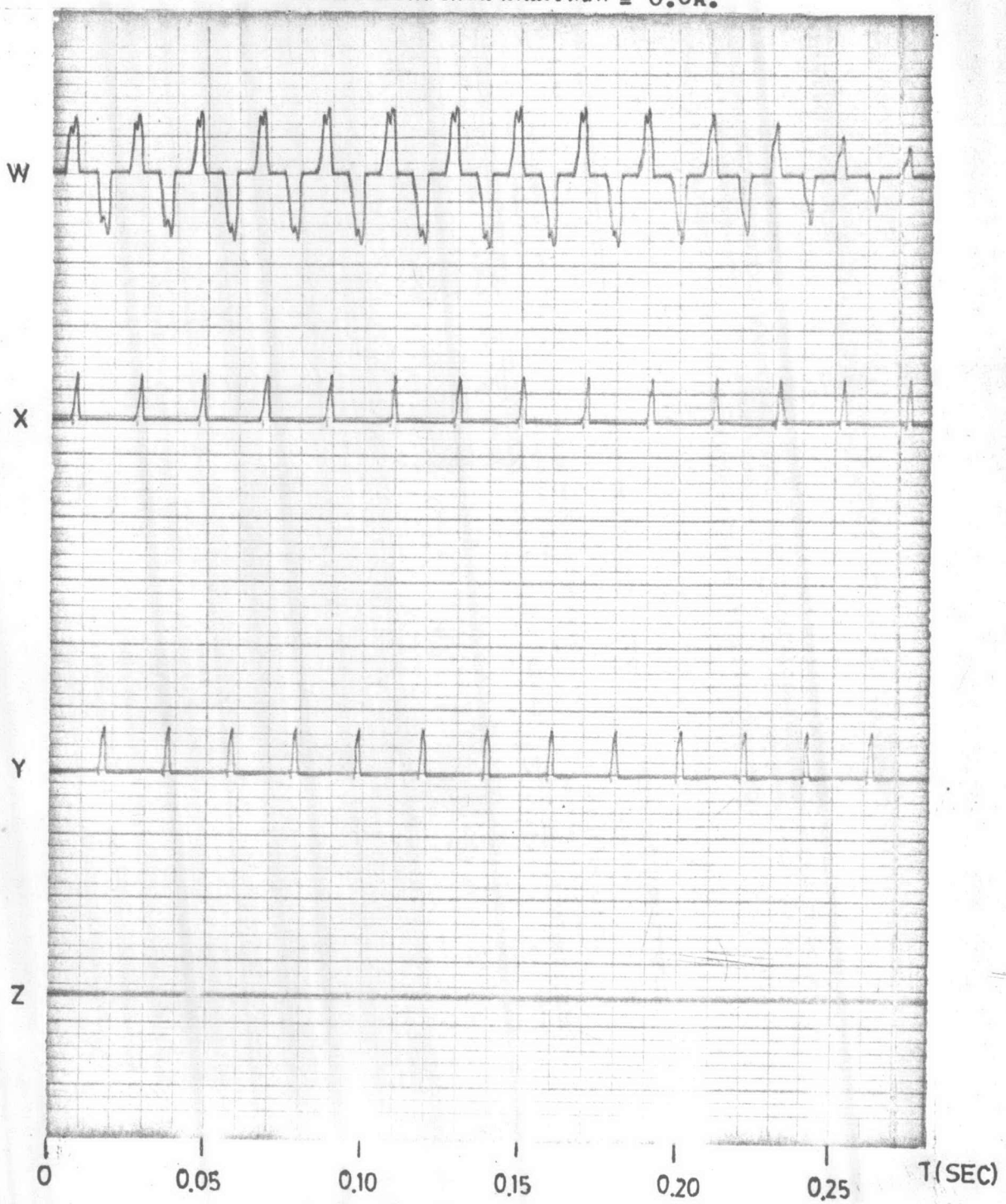
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.7

speed 1500 rpm, trigger angle = + 40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W, Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

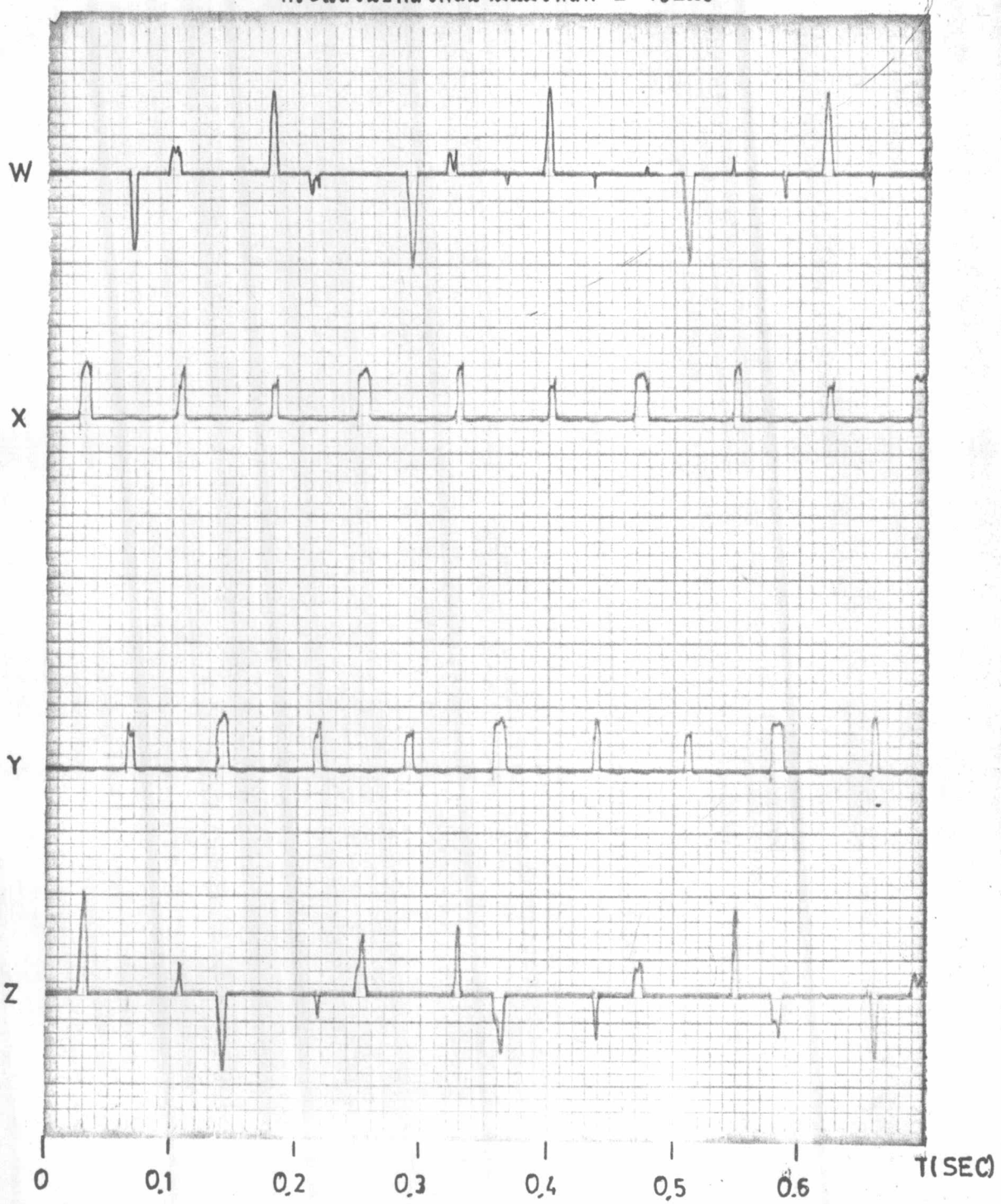
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P, P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N, N'

FIG.5.8

speed 400 rpm, trigger angle = +40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

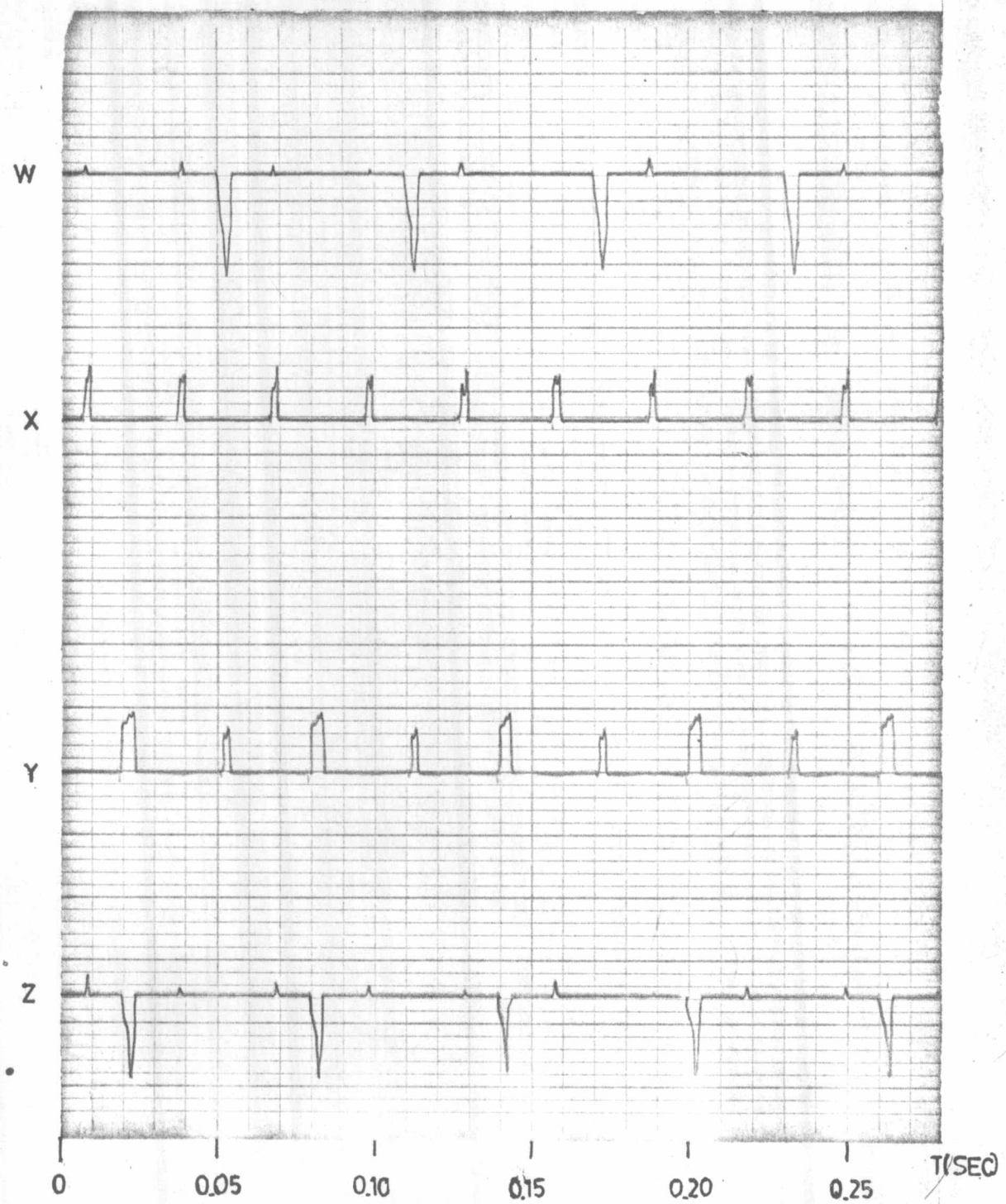
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.9

speed 1000 rpm, trigger angle = +40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

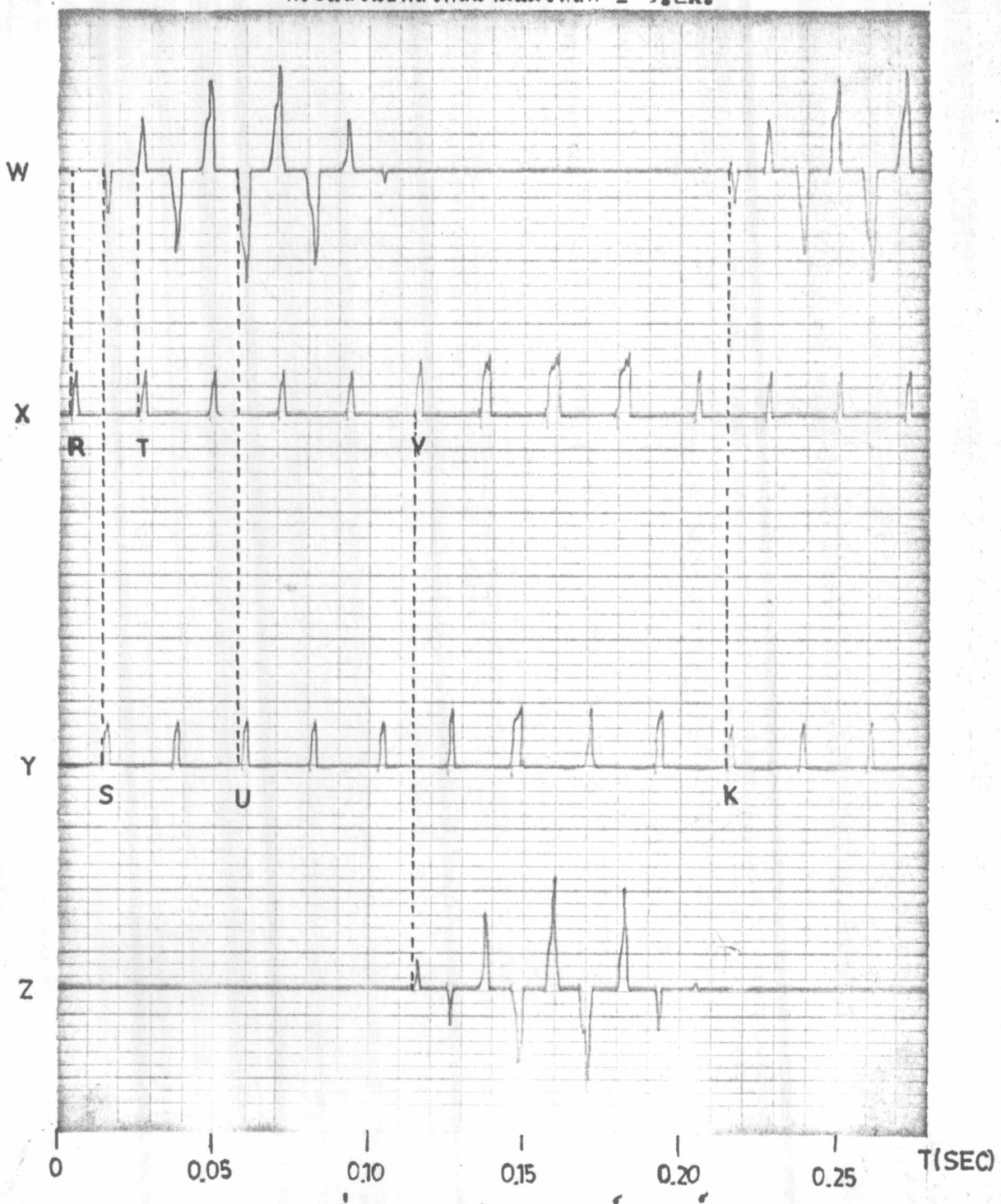
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดขนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดขนวน thyristor N,N'

FIG. 5.10

speed 1500 rpm, trigger angle = +40°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W, Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

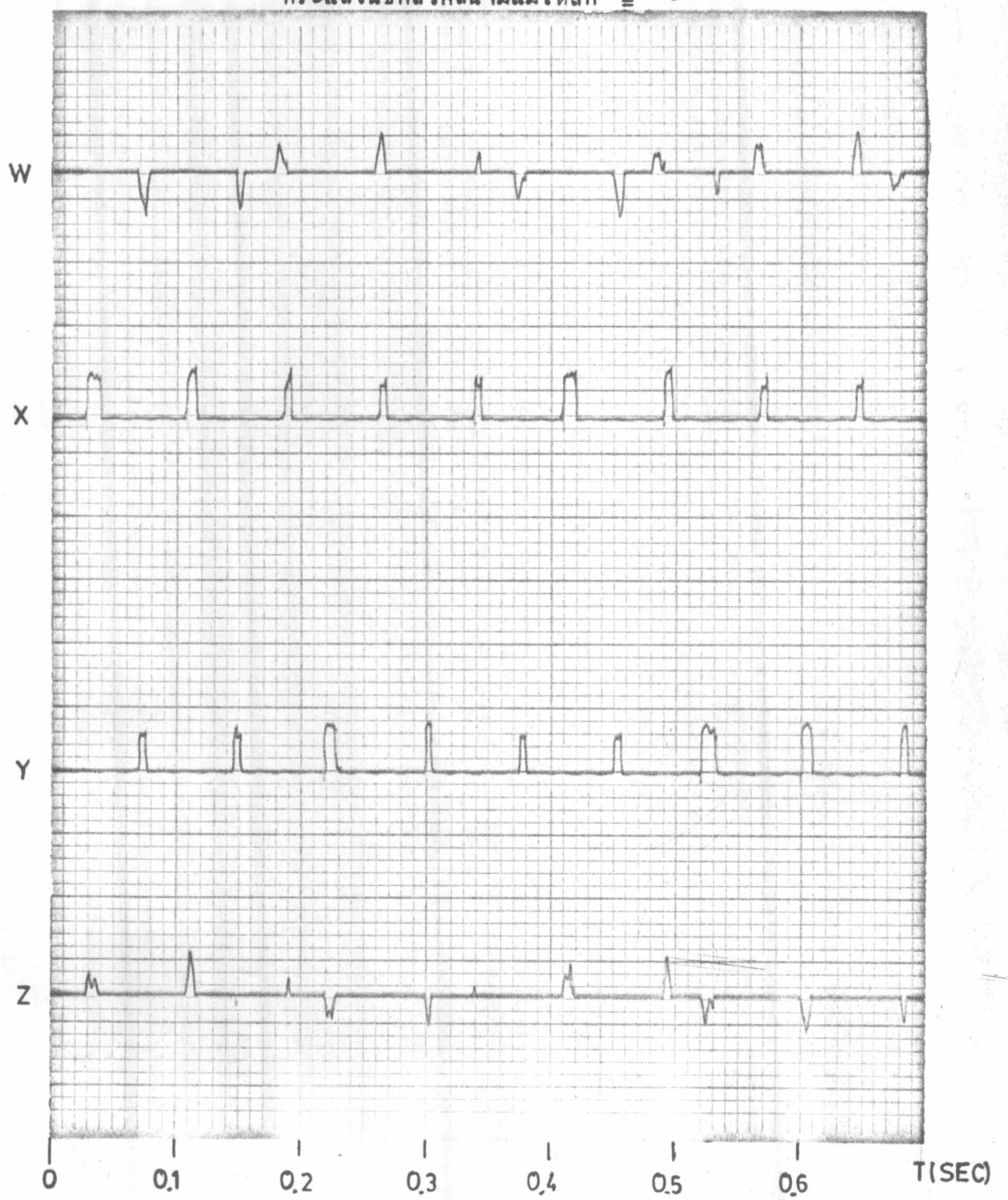
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P, P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N, N'

FIG. 5.11

speed 400 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

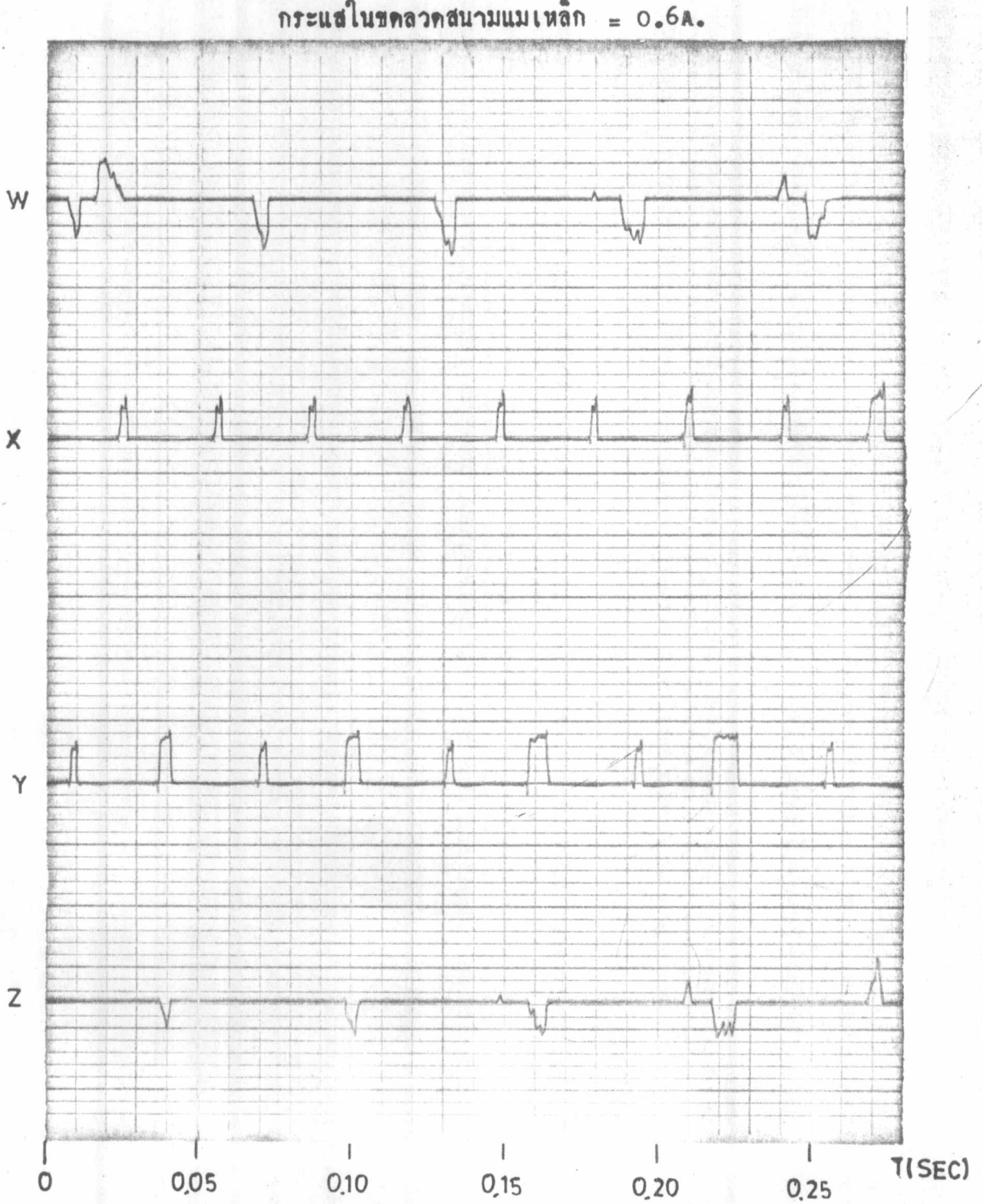
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.12

speed 1000 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

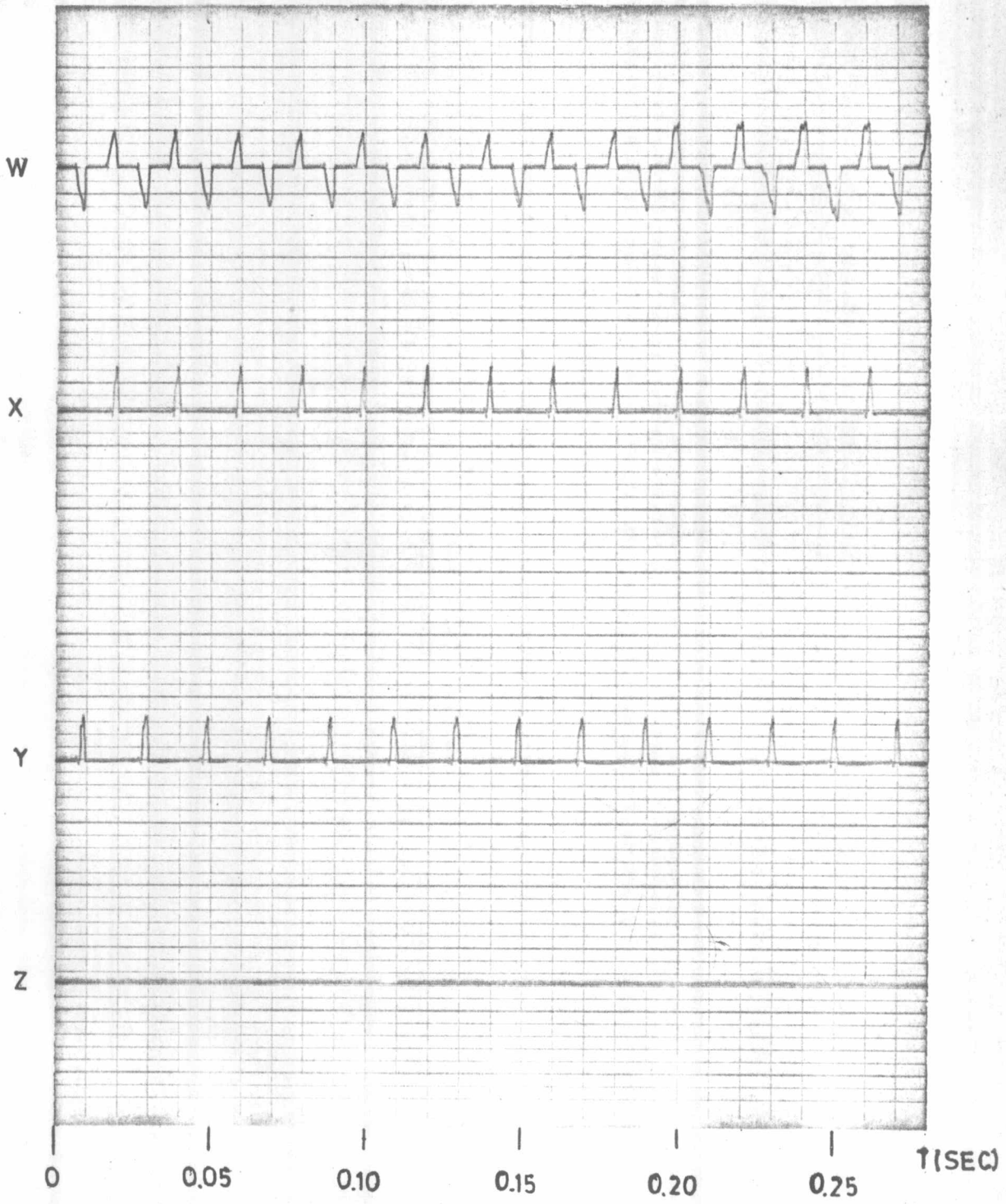
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.13

speed 1500 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 0.6A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

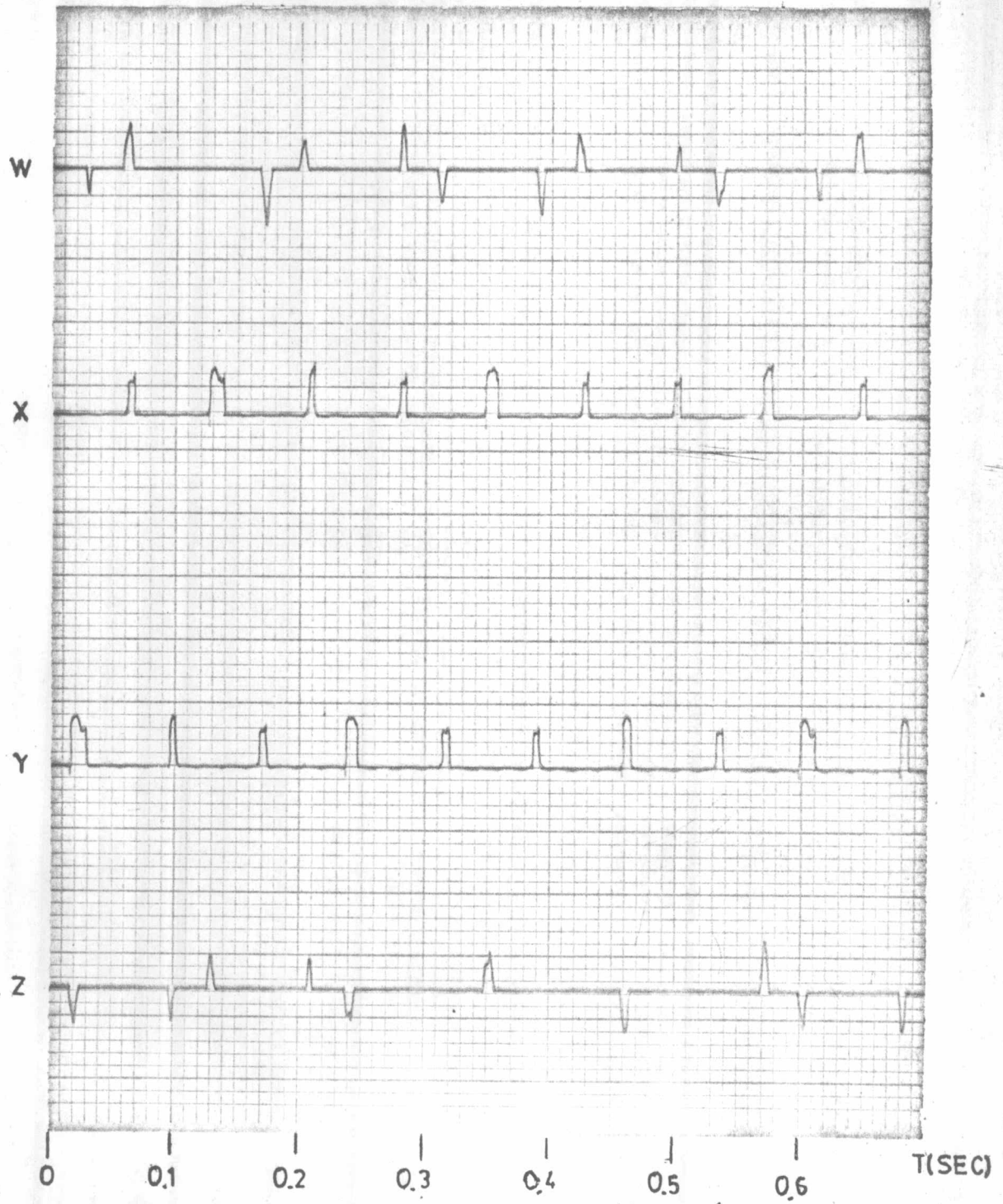
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.14

speed 400 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

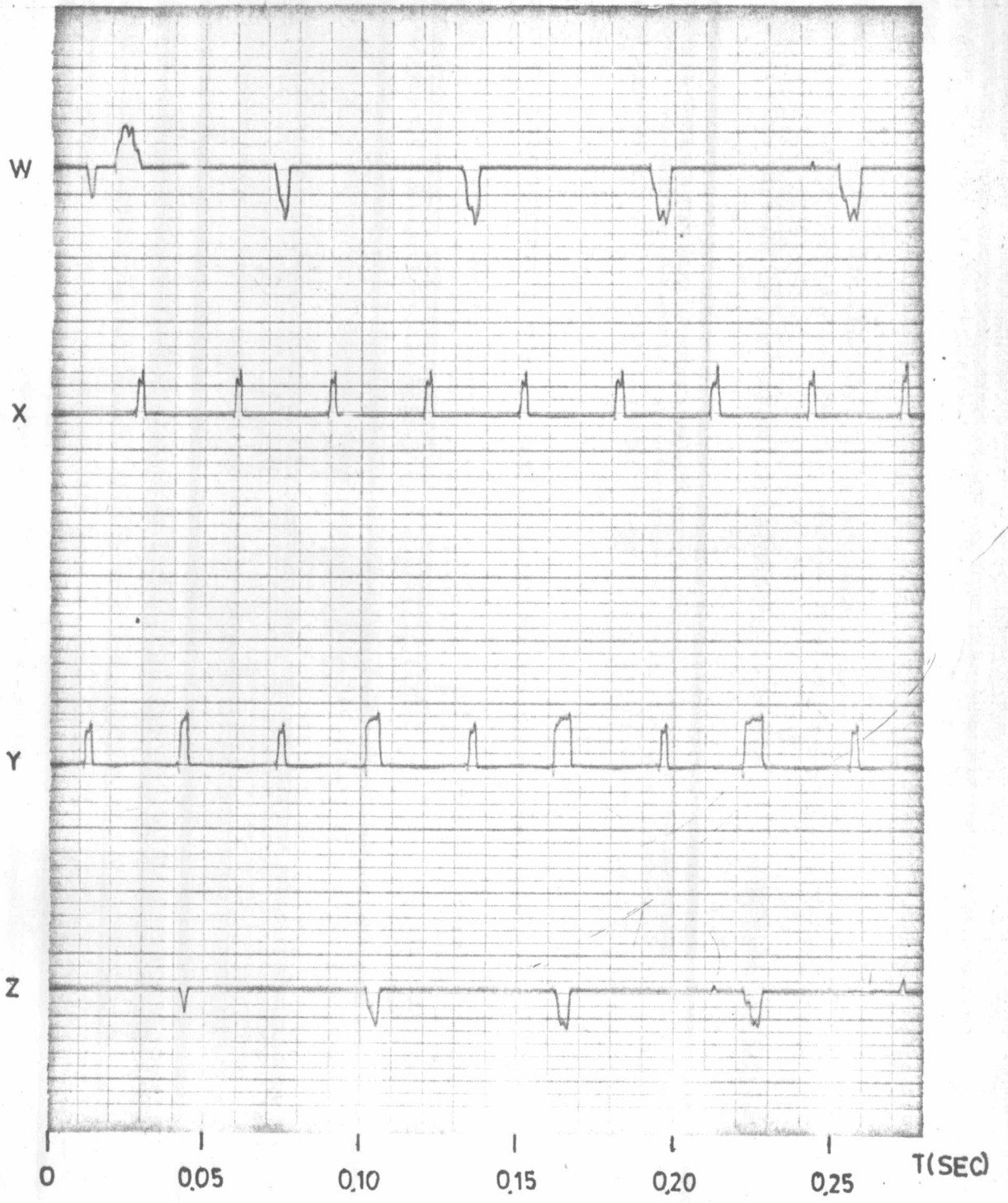
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.15

speed 1000 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

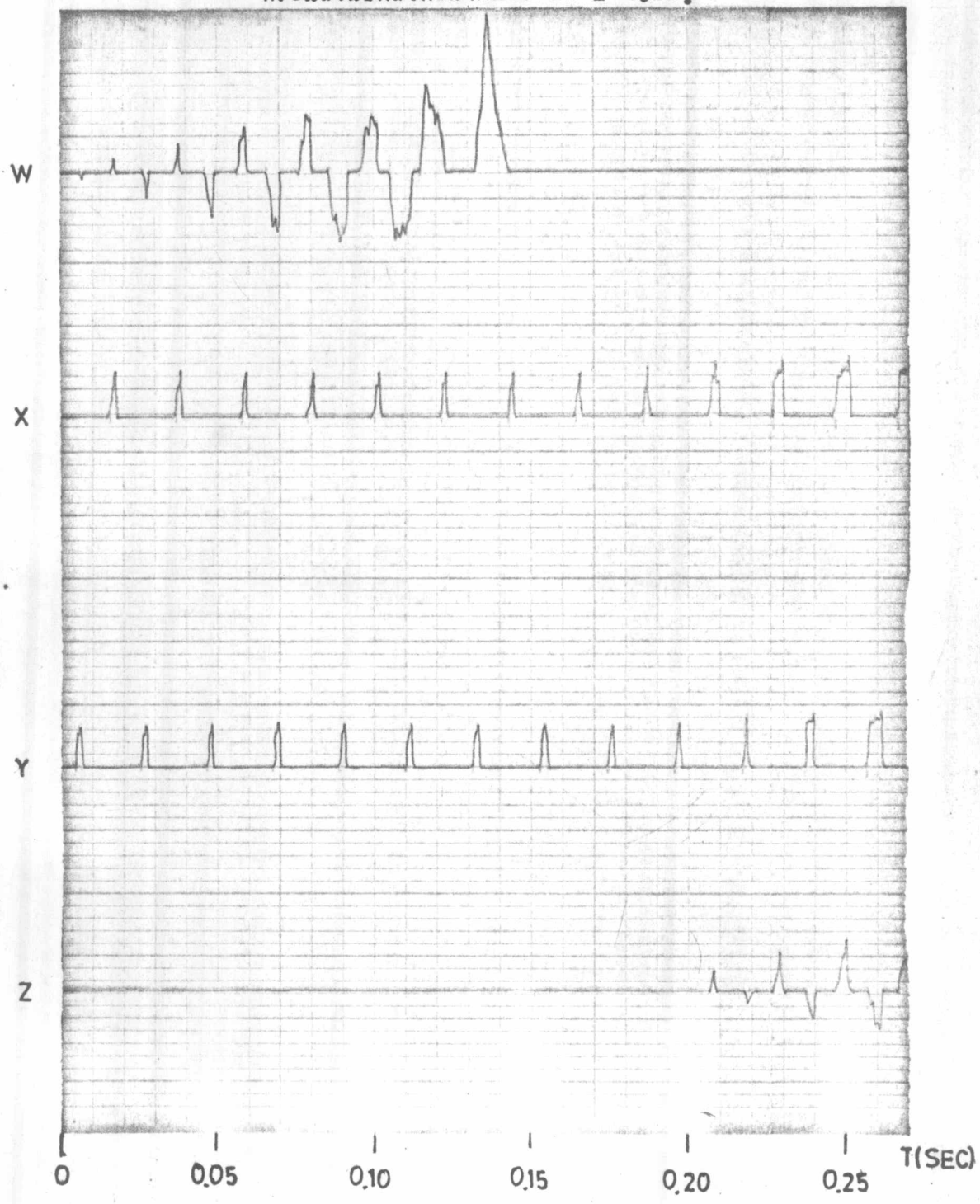
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.16

speed 1500 rpm, trigger angle = + 20°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W, Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

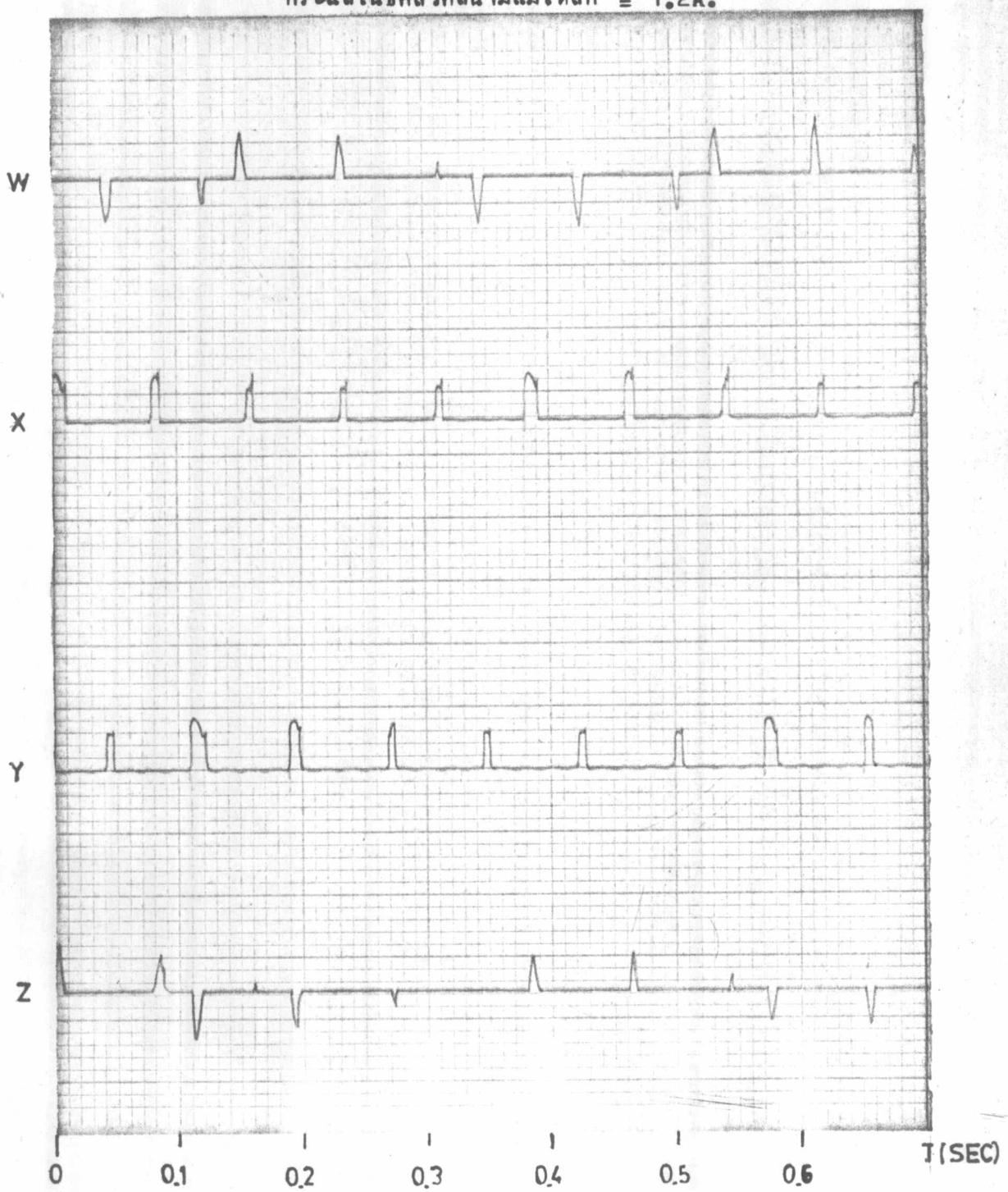
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P, P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N, N'

FIG.5.17

speed 400 rpm, trigger angle = 0°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

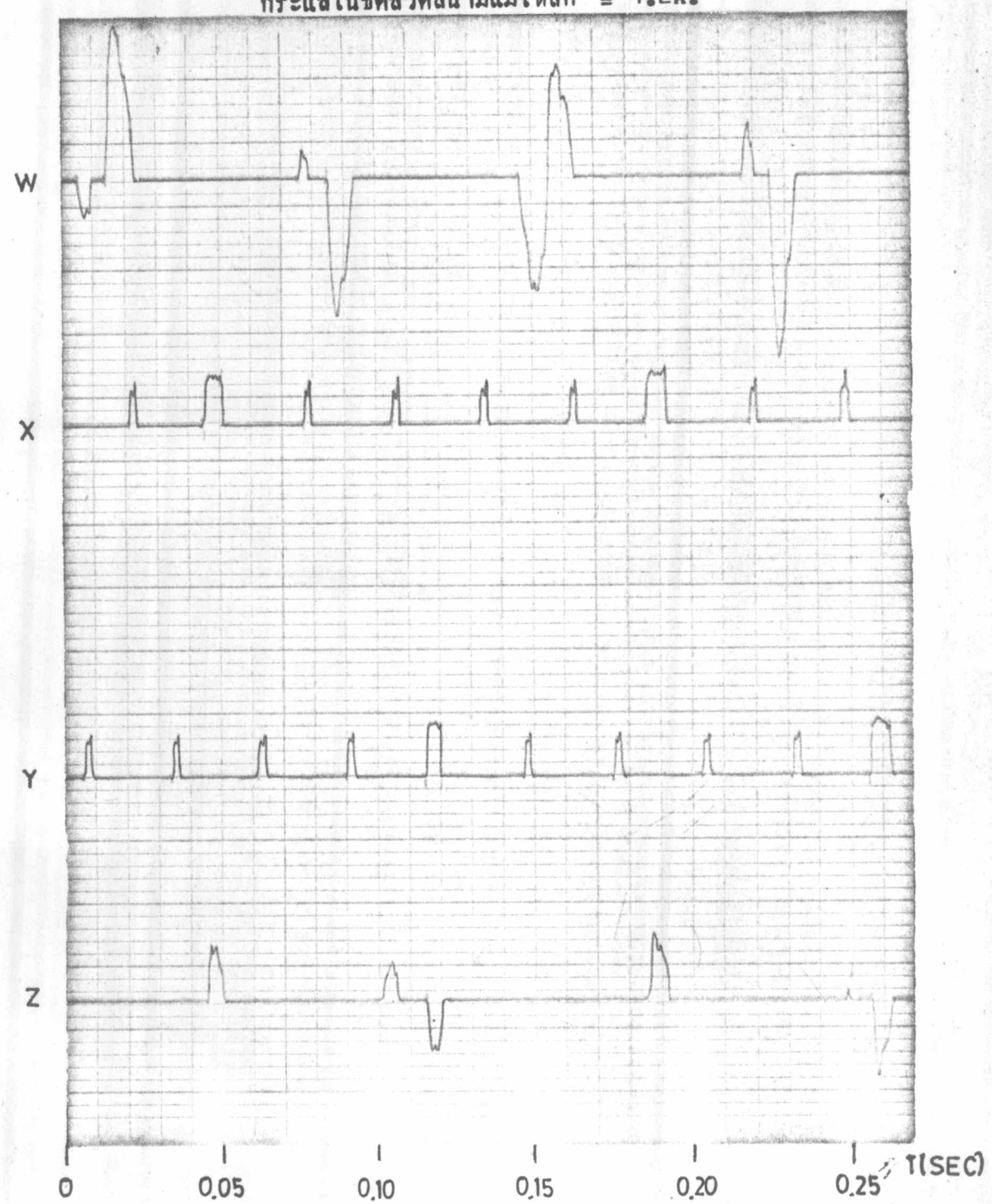
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.18

speed 1100 rpm, trigger angle = 0°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

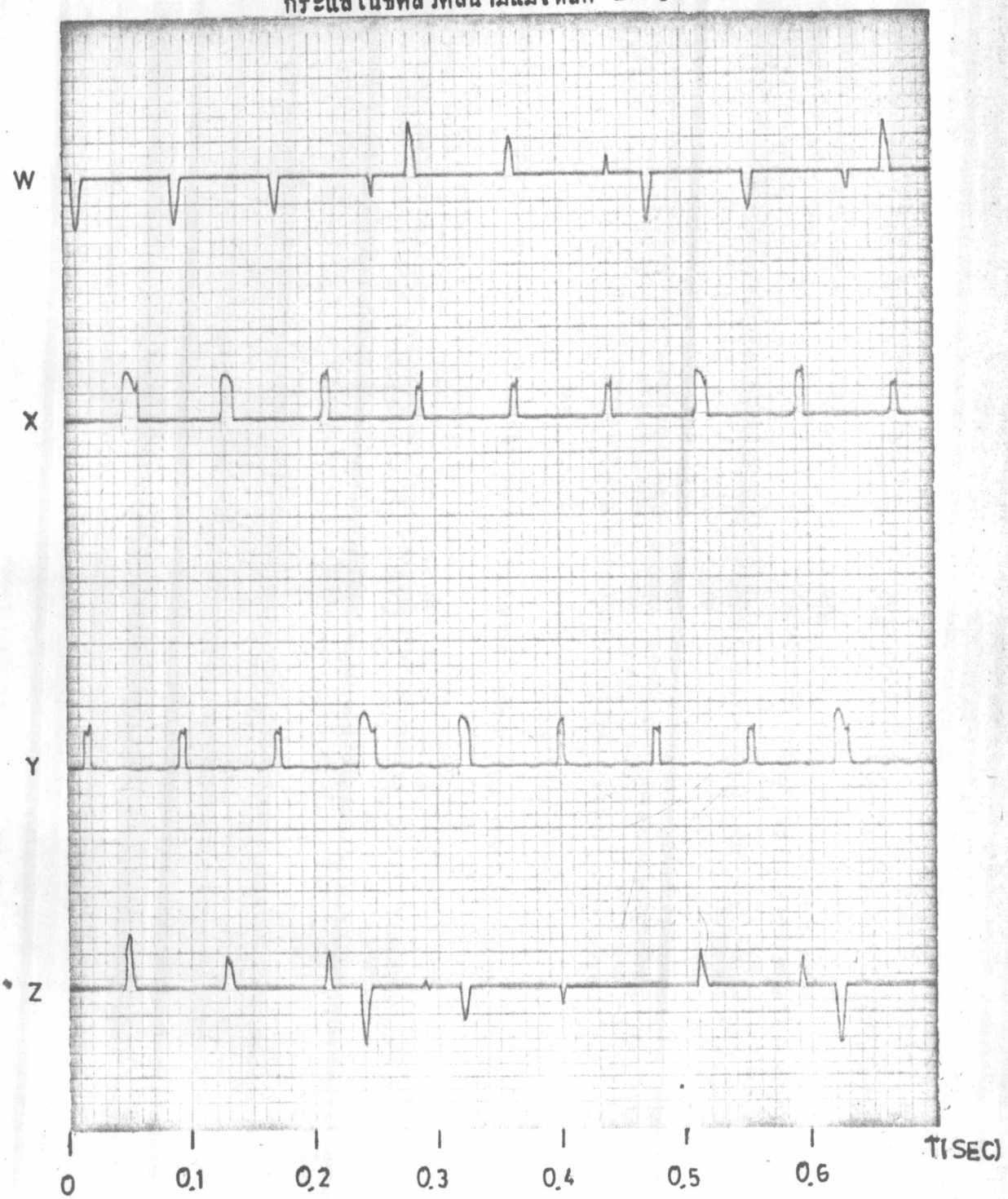
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG.5.19

speed 400 rpm, trigger angle = 10°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

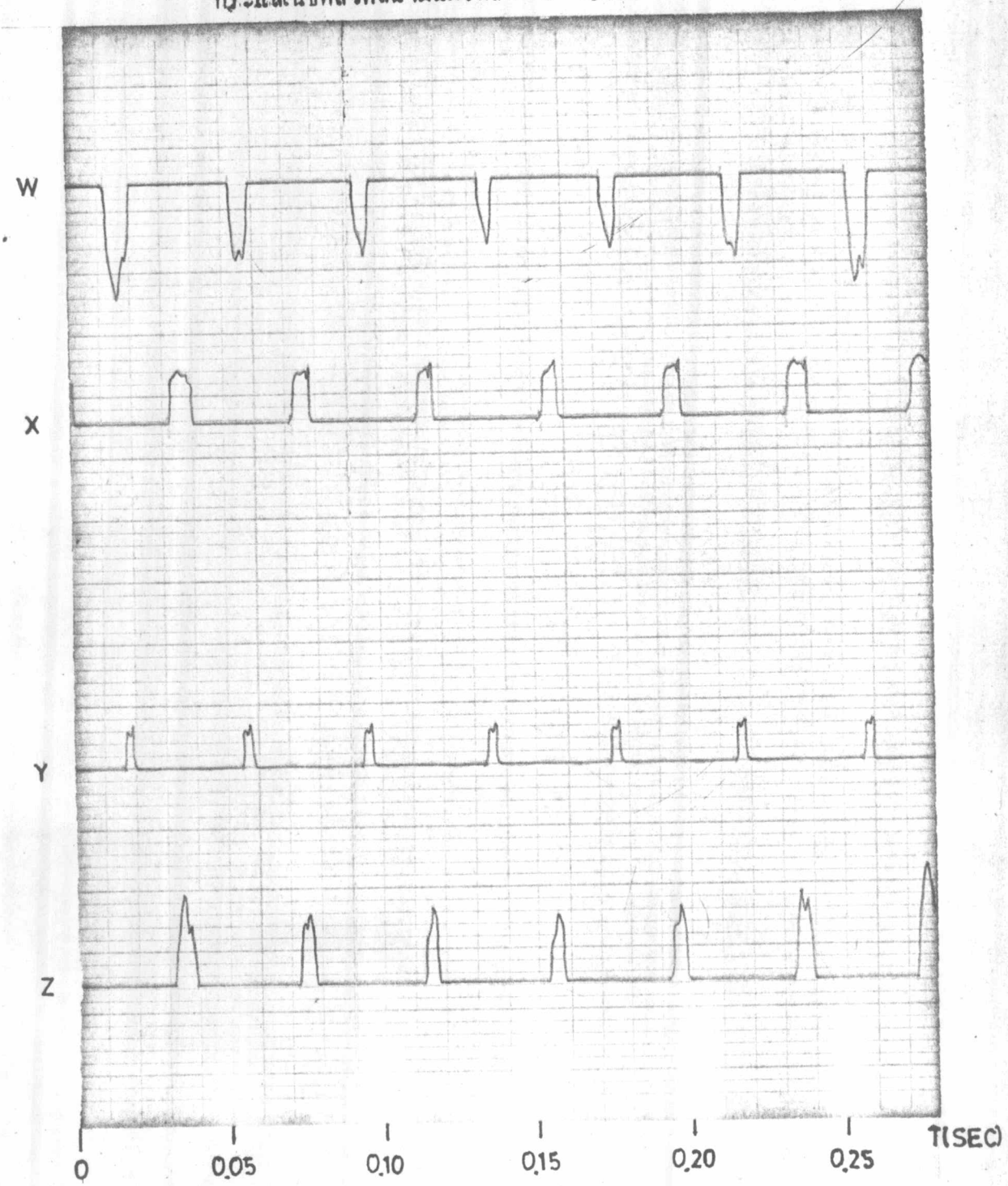
X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'

FIG. 5.20

speed 890 rpm, trigger angle = -10°

กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก = 1.2A.



W,Z รูปคลื่นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

X รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor P,P'

Y รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันที่ไปจุดชนวน thyristor N,N'