

การศึกษาการวัดแรงบิดโดยอ้อมโดยใช้คุณลักษณะการสั่นของมอเตอร์ขันสกรู

Study of indirect torque measurement using vibration characteristics of screw motor

ทัศนีย์ โพธิ์ศรี¹, ชลธิ์ โพธิ์ทอง²

Tatsanee Phosri¹, Chonlatee Photong²

Received: 24 March 2021 ; Revised: 18 June 2021 ; Accepted: 5 October 2021

บทคัดย่อ

หนึ่งในวิธีการประกอบชิ้นงานที่เป็นที่นิยมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมคือ การยึดชิ้นงานด้วยการขันสกรูเพื่อจับยึด เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการแก้ไขในภายหลังในกรณีที่ต้องการแยกชิ้นงานออกจากกัน อย่างไรก็ตาม การขันยึดสกรูจะต้องทำด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันการขันที่หลวมหรือแน่นเกินไปซึ่งอาจทำให้การยึดชิ้นงานไม่แน่นหรืออาจก่อให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานได้ แรงบิดเป็นค่าตัวแปรที่นิยมใช้ในการกำหนดความเหมาะสมของการขันสกรูด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แต่มอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อขันสกรูส่วนใหญ่ไม่มีการแสดงแรงบิดของการขันสกรู งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการวัดค่าแรงบิดโดยอ้อมโดยใช้คุณลักษณะการสั่นของมอเตอร์ขันสกรู เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์ทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของชุดทดลองและส่วนไฟฟ้าทำหน้าที่สร้างการสั่นสะเทือนและส่วนตรวจวัด และวิเคราะห์ค่าทำหน้าที่แสดงค่าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย การทดลองแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองเพื่อวัดแรงบิดจากระดับแรงดัน rms ที่เกิดจากการสั่นสะเทือน และที่ได้จากค่าระลอกคลื่นการสั่นสะเทือน ค่าที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดมาตรฐาน การทดลองพบว่า ค่าแรงดันที่ได้จากการวัดค่าแรงดันของการสั่นสะเทือนมีค่าระหว่าง 7.70-23.47 นิวตัน-เมตร เทียบกับ 13.38-29.30 นิวตัน-เมตร ของค่ามาตรฐาน ซึ่งมีค่าสมการถดถอยเท่ากับ 0.7672 มีค่าความถูกต้องการวัด 84.27 % ส่วนค่าแรงบิดที่ได้จากค่าระลอกคลื่นการสั่นสะเทือนมีค่าระหว่าง 13.82-23.49 นิวตัน-เมตร เทียบกับ 13.38-29.30 นิวตัน-เมตร ของค่ามาตรฐาน ซึ่งมีค่าสมการถดถอยเท่ากับ 0.9786 มีค่าความถูกต้องการวัด 99.34 % ดังนั้น การวัดค่าแรงบิดโดยอ้อมจากการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพ โดยการวัดแรงบิดจากระลอกคลื่นการสั่นมีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าการวัดจากค่าระดับแรงดันที่เกิดจากการสั่นสะเทือน

คำสำคัญ: การวัดแรงบิด แรงบิดโดยอ้อม การสั่นสะเทือน ส่วนไฟฟ้า

Abstract

One of the most commonly used methods for assembling components for the industry factories is by using screws. This is because of its convenience, fast and ease for de-assembling which could be done later. However, screwing the components must be performed carefully; otherwise, the components may ease to loosen or break. The Torque is the most popular parameter to control the optimum screwing by using the electric motor screwdriver. Unfortunately, most screwdrivers do not have the torque measurement function. This research presents a study of indirect torque measurement by using vibration characteristics of a screw motor, which could be an alternative solution for related applications. The experimental test-rig consists of 2 parts: an electric screwdriver for vibration generation and measurement and an analysis unit for data collection and analysis. There are 2 experimental test scenarios: torque measurement from generated vibration voltage levels in rms and vibration ripples. These measured values of torque were compared with values measured by the standard torque-speed measurement. The test results showed that the torque values measured from vibration voltage levels in rms had values between 7.70-23.47 N.m compared to 13.38-29.30

¹ นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

¹ Master degree student, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham, 44150

² Assoc. Prof.Dr., Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham, 44150

N.m of standard values, which had R2 of 0.7672 and accuracy of 84.27%. Alternatively, the torque values measured from vibration ripples had values between 13.82-29.30 N.m, which had R2 of 0.9786 and an accuracy of 99.34%. These results revealed that measurement torque indirectly from motor's vibration is feasible and effective. The proposed measurement by using vibration ripple provides better accuracy and precision than using vibration voltage level.

Keywords: Torque measurement, indirect torque, vibration, screw driver

บทนำ

ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน อาทิเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกันในกระบวนการเหล่านั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี (อนุชา วัฒนาภา และคณะ, 2553) ได้แก่ การจับยึดแบบถาวรและการจับยึดแบบชั่วคราว ตัวอย่างการจับยึดแบบถาวร ได้แก่ การเชื่อม การจับยึดด้วยกาวหรือการใช้รีเวต (rivet) (NISHI, 2004) ส่วนการจับยึดแบบชั่วคราวสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ การจับยึดที่ใช้เกลียว ซึ่งประกอบไปด้วย โบลท์ (bolt), นัท (nut) และสกรู (screw) ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งคือ การจับยึดที่ไม่ใช้เกลียว ซึ่งได้แก่ ตัวล็อกแบบกุญแจ (key), ตัวล็อกแบบเข็ม (pin) (Hetenyi, 1943) ในการประกอบชิ้นงานด้วยสกรูจะเป็นชิ้นส่วนมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป เนื่องจากมีความสะดวกและค่อนข้างแข็งแรง โดยอาศัยหลักการขันอัดชิ้นงานให้ติดกันและสามารถคลายออกได้โดยไม่เกิดความเสียหาย นอกจากนี้ สกรูยังถูกใช้งานอย่างอื่นด้วย เช่น การส่งกำลังการเคลื่อนที่ (Owen & Cleary, 2009) ป้องกันการรั่วซึม การผ่อนแรง เป็นต้น สกรูจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมทั่วไป (Terrier, 2010)

อย่างไรก็ตาม การใช้สกรูจะยึดชิ้นงานได้อย่างมีคุณภาพ (Freund, 2000) จะต้องมีการตรวจวัดค่าแรงบิดของเครื่องขันสกรูที่เหมาะสม เพราะแรงบิดมีความสำคัญมากต่อการยึดติดชิ้นงาน แรงบิดที่ใช้ในการประกอบชิ้นงานจะต้องมีขนาดแรงบิดที่เหมาะสมต่อชิ้นงาน เพื่อให้ทั้งตัวชิ้นงานและตัวสกรูไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นการตรวจวัดค่าแรงบิดที่ใช้ในการขันสกรูประกอบชิ้นงานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การตรวจวัดค่าแรงบิดของเครื่องขันสกรูในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการวัดโดยตรง (direct) (Vaez-Zadeh, 2018) และ วิธีการวัดโดยอ้อม (indirect) (Dib, 2012) โดยวิธีการวัดโดยตรงเป็นการหาค่าสัญญาณแรงบิดจากระบบขันสกรู (drive train) (Pitipong, 2010) ผ่านหน้าจานวัดแรงบิด (torque flanges) (Andrae, 2001) อาทิเช่น digital torque transducer วิธีการวัดแบบนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ตอบสนองรวดเร็ว ความถูกต้องสูง (high accuracy) และ ความแม่นยำสูง (high precision) อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดแบบนี้มีข้อจำกัดคือ เครื่องวัดมีราคาแพง สามารถประยุกต์ใช้งานได้กับงานเฉพาะ

บางประเภทเท่านั้น ส่วนวิธีการวัดแบบโดยอ้อม เป็นการแปรค่าแรงบิดจากค่าสัญญาณอื่นเพื่อประมาณค่าของแรงบิด วิธีการวัดโดยอ้อมนี้นิยมใช้กับการวัดค่าแรงบิดในอุปกรณ์หรือเครื่องจักรสมัยใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัญญาณที่วัดได้สามารถใช้ในการวิเคราะห์งานด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย และการวัดโดยตรงไม่เหมาะสมกับการทดสอบแบบไดนามิกสำหรับเครื่องจักรมีขนาดใหญ่ เพราะจะทำให้เกิด "mechanical low pass" (Suzuki, 2020) วิธีการวัดนี้มีข้อเสียคือ ค่าที่ได้มีความผิดพลาดสูง (high error) ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการแปลงค่าแรงบิดแบบทางอ้อม ความสูญเสียกำลัง หรือสภาพปัจจัยภายนอกอื่นๆ นอกจากนี้ การสอบเทียบ (calibration) (Dawkins *et al*, 2001) สำหรับอุปกรณ์วัดด้วยวิธีการนี้ก็ทำได้ยากและต้องทำสม่ำเสมอ (British Standards Institution, 2008) แต่การวัดแรงบิดโดยอ้อมมีความสะดวกมากกว่าการวัดโดยตรง ทั้งนี้ เพราะทำขึ้นได้ง่ายและมีความแม่นยำในระดับที่สามารถใช้งานได้ ในอุตสาหกรรม ซึ่งค่าที่วัดได้สามารถใช้วิเคราะห์งานด้านอื่นได้ด้วยเพิ่มเติม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดโดยตรง (Ozcan, 2004) ที่ทำขึ้นได้ยากกว่าและประยุกต์ใช้งานเฉพาะบางประเภทเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะการศึกษาการวัดและการวิเคราะห์ค่าแรงบิดโดยอ้อม เพื่อตอบสนองการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักรขนาดเล็ก โดยการวัดค่าแรงบิดโดยอ้อมได้ค่าที่เป็นที่ยอมรับและใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะหาค่าของแรงบิดจากการสั่นสะเทือน โดยการวัดค่าแรงบิดโดยอ้อม โดยหาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับการสั่น ซึ่งมีบทความอื่นๆ ที่ได้กล่าวไว้เช่นกัน งานวิจัย Zhao (2013) ได้ทำการวิเคราะห์และได้ข้อสรุปความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นและแรงบิดของมอเตอร์ แล้วทำการบันทึกไว้เพื่อที่จะนำไปใช้ในการลดความไม่สม่ำเสมอของแรงบิดของมอเตอร์ในการใช้งานจริง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์แบบใหม่ ที่ควบคุมกระแสขาเข้าในขดลวดที่ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของแรงบิด สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและขยายช่วงการใช้งานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ได้ (Zribi & Chiasson, 1991)

วิธีการดำเนินการศึกษา

Figure 1 แสดงส่วนประกอบของชุดทดลองเพื่อการวิจัยในครั้งนี้ ชุดทดลองประกอบด้วยวัสดุและอุปกรณ์ดังนี้

- 1) ชุดทดลองการสั่นสะเทือน เครื่องจำลองการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำในแนวตั้ง ด้วยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด โดยใช้ตัวกำเนิดการสั่นสะเทือนด้วยมอเตอร์ ทำการทดลองการเคลื่อนที่ของขดลวดผัดผ่านสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ประกอบแกนด้วยขดลวดเป็น PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หนา 1.4 มิลลิเมตร ขนาดแม่เหล็กแรงสูงทรงกระบอกมีระยะความสูง 2 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ขนาดช่องว่างอากาศมีระยะ 2.5 มิลลิเมตร
- 2) ส่วนไฟฟ้า HITACHI รุ่น DV13VSS กำลังไฟ 550W
- 3) Oscilloscope ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GDS-2074A สำหรับอ่านค่าสัญญาณการสั่น
- 4) Digital Tachometer DT-2234C เครื่องวัดรอบสำหรับวัดรอบ วัดรอบมอเตอร์ วัดรอบแบบใช้แสงวัดค่าความแม่นยำสูงเวลาในการตรวจวัดที่รวดเร็วและระยะตรวจจับระยะยาวได้ถึง 500 มม. (20 นิ้ว) ด้วยเลเซอร์
- 5) EM01- Digital Clamp meter DT3266L วัดกระแสไฟฟ้า วัดแรงดันไฟฟ้า วัดความต้านทาน วัดความต่อเนื่อง

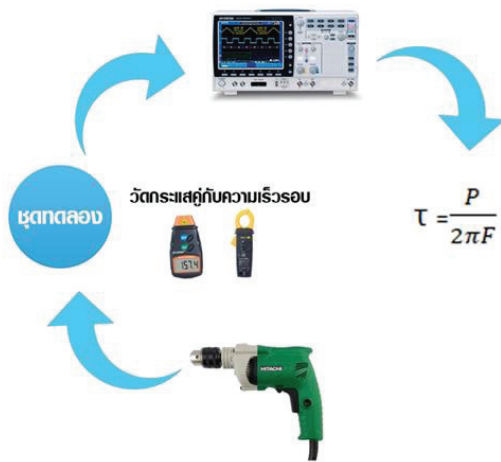


Figure 1 Research kit components

การทดลองเป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าความถี่ที่อ่านได้จากกราฟ (i_{rms}) และ แรงดันไฟฟ้า (v_{rms}) เพื่อเป็นค่าตัวแปรที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าแรงบิด (T) ที่เกิดขึ้นด้วยสมการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกลและไฟฟ้าดังแสดงในสมการ (1)

$$T = \frac{v_{rms} \times I_{rms}}{2 \times \pi f} \tag{1}$$

- τ = คือ แรงบิดของแรง หน่วยเป็น นิวตัน.เมตร
- V_{rms} = คือ ค่าแรงดันที่ได้จากการวัด
- I_{rms} = คือ ค่ากระแสที่ได้จากการวัด
- F = ค่าความถี่

การทดลองดำเนินการทั้งหมด 100 รอบ โดยส่วนไฟฟ้าทำการทดลองพร้อมกับบันทึกค่ากระแส ค่าความเร็วรอบเพื่อนำมาคำนวณหาค่าแรงบิด จากนั้นใช้ข้อมูลนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) มัชฐาน (Median) ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation ; SD) ในการวิเคราะห์ โดยค่าเฉลี่ย และมัชฐาน ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความถูกต้อง (Accuracy) ส่วนค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้วิเคราะห์ค่าความแม่นยำ (Precision) ของวิธีการวัด การคำนวณแรงบิดในการวิจัยดำเนินการด้วย 2 วิธีการคำนวณ ได้แก่ การคำนวณจากค่าแรงดันเฉลี่ย (rms voltage หรือ V_{rms}) ซึ่งเป็นค่าระดับแรงดันจากขาของเซ็นเซอร์ (Optional pin) ที่ได้แปลงค่าการสั่นสะเทือนเป็นระดับแรงดันด้วยวงจรภายในของเซ็นเซอร์ และการคำนวณจากค่าความถี่ระลอกคลื่น (Ripple frequency, f_{ripple}) โดยตรง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดมาตรฐาน โดยค่ามาตรฐานได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดแรงบิดมาตรฐาน รุ่น Makita B-28531 UltraMag Magnetic Bits Holder.

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

Figure 2 แสดงตัวอย่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ที่บันทึกโดยออสซิลโลสโคปขณะที่สว่างไฟฟ้้าเกิดการสั่น และ Table 1 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการวัด และค่าแรงบิดที่ได้จากค่าการคำนวณจากค่าระลอกคลื่น (Ripple) และจากค่าแรงดัน rms (V_{rms}) เทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากเครื่องมาตรฐาน

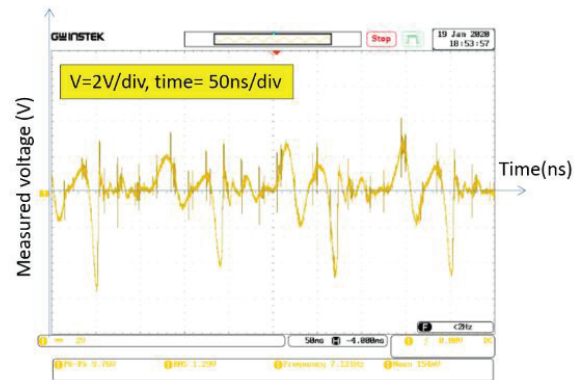


Figure 2 Example of the current signal measured in an experimental set with an oscilloscope.

Table 1 Experimental variable data

Test No.	Ripples (Hz)	Speed (rpm)	Voltage (V_{rms})	Current (A_{rms})	Torque standard (N.m)	Torque V_{rms} (N.m)	Torque Ripples (N.m)
1	7.14	345	1.29	0.90	29.30	16.52	23.67
2	7.14	441.7	1.63	0.86	21.85	12.48	22.59
3	8.33	496.9	1.65	0.83	18.72	11.88	18.67
4	7.14	463.3	1.64	0.84	20.34	12.11	22.07
5	7.14	416.4	1.72	0.85	22.90	11.69	22.33
6	7.02	430.3	1.61	0.85	22.27	12.55	22.84
7	18.18	664.1	2.95	0.96	16.24	7.70	9.92
8	20.00	678.3	2.52	0.94	15.55	8.82	8.82
9	7.14	616.8	1.44	0.90	16.32	14.73	23.56
10	7.14	666.8	1.74	0.91	15.35	12.40	23.96
11	12.50	708.4	2.03	0.92	14.63	10.77	13.87
12	7.14	457.3	1.35	0.90	22.01	15.71	23.56
13	7.69	429	1.64	0.92	23.98	13.22	22.37
14	7.14	256.2	1.3	0.94	21.08	17.06	24.64
15	11.11	635.8	2.14	0.95	16.76	10.50	16.04
16	7.14	772.3	2.23	0.98	14.30	10.44	25.85
17	8.33	576	1.25	0.93	18.17	17.65	21.01
18	5.88	349	0.95	0.89	28.71	22.23	28.49
19	5.88	347.8	0.909	0.89	28.71	23.16	28.39
20	8.33	497.3	1.44	1.03	23.33	16.98	23.28
21	6.06	366.3	0.938	0.89	27.32	22.49	27.62
22	10.53	659.1	1.32	0.88	15.00	15.79	15.71
23	7.14	417.3	1.19	0.83	22.42	16.58	21.91
24	7.14	430.6	1.21	0.89	23.14	17.36	23.33
25	7.14	408.3	1.09	0.88	24.04	18.99	22.99
26	6.90	399.5	0.9	0.89	25.08	23.47	24.30
27	6.67	406.2	1.06	0.83	23.04	18.61	23.47
28	6.67	399	1.05	0.86	24.30	19.46	24.32
29	6.67	385.7	1	0.86	25.05	20.36	24.23
30	6.67	399.3	1.14	0.84	23.52	17.36	23.56
31	6.67	404.4	1.11	0.83	22.97	17.64	23.31
32	7.02	363	1.16	0.88	27.32	18.02	23.64
33	6.67	400.1	1.11	0.87	24.40	18.54	24.49
34	6.67	400.3	1.07	0.84	23.40	18.46	23.50
35	6.67	398.6	1.14	0.83	23.34	17.20	23.33
36	5.88	361	0.99	0.88	27.41	21.07	28.14

Table 1 Experimental variable data (cont.)

Test No.	Ripples (Hz)	Speed (rpm)	Voltage (V_{rms})	Current (A_{rms})	Torque standard (N.m)	Torque V ($N.m$) _{rms}	Torque Ripples (N.m)
37	7.02	408.3	1.09	0.86	23.52	18.57	22.89
38	6.67	401.5	1.07	0.85	23.81	18.83	23.98
39	7.14	427.5	1.19	0.88	23.07	17.47	23.09
40	7.14	419.3	1.18	0.88	23.65	17.72	23.22
41	7.14	418	1.13	0.89	23.94	18.67	23.43
42	6.67	405.7	1.14	0.85	23.40	17.55	23.81
43	7.14	389.2	1.02	0.89	25.57	20.57	23.30
44	6.67	399.9	1.14	0.84	23.68	17.51	23.76
45	6.67	400.9	1.14	0.85	23.68	17.55	23.81
46	6.45	385.4	1.07	0.87	25.21	19.14	25.19
47	6.45	389.4	1.02	0.87	25.04	20.15	25.28
48	6.25	373.4	0.96	0.89	26.83	22.00	26.81
49	6.90	428.3	0.993	0.88	22.97	20.89	23.86
50	7.14	422	1.14	0.86	22.97	17.92	22.70
51	7.14	435.7	1.03	0.89	22.94	20.46	23.41
52	7.14	440.4	1.11	0.94	24.02	20.09	24.77
53	7.69	464.4	1.19	0.92	22.20	18.26	22.42
54	7.14	444.4	1.09	0.87	21.97	18.88	22.86
55	7.14	444.1	1.11	0.90	22.61	19.07	23.51
56	11.11	640	1.35	0.86	15.15	15.14	14.59
57	11.11	661.3	1.38	0.86	14.52	14.67	14.46
58	11.11	688.6	1.54	0.84	13.75	12.96	14.25
59	12.50	689	1.6	0.85	13.91	12.62	12.82
60	11.11	691	1.51	0.84	13.57	13.09	14.12
61	11.11	690.5	1.43	0.83	13.55	13.79	14.08
62	11.76	394.1	1.16	0.84	23.91	17.13	13.40
63	11.11	680.5	1.66	0.84	13.80	11.93	14.14
64	11.11	693.7	1.68	0.83	13.41	11.67	14.00
65	11.11	670	1.51	0.84	14.08	13.17	14.20
66	11.11	638.5	1.79	0.83	14.57	10.95	14.00
67	10.53	663.4	1.59	0.86	14.46	12.72	15.24
68	11.11	693.3	1.87	0.83	13.38	10.46	13.97
69	8.33	492.2	1.08	0.88	19.99	19.21	19.75
70	8.33	520.5	1.17	0.81	17.44	16.35	18.22
71	8.00	483.9	1.11	0.82	18.92	17.39	19.14
72	8.00	480.6	1.07	0.82	19.24	18.21	19.33

Table 1 Experimental variable data (cont.)

Test No.	Ripples (Hz)	Speed (rpm)	Voltage (V_{rms})	Current (A_{rms})	Torque standard (N.m)	Torque V_{rms} (N.m)	Torque Ripples (N.m)
73	7.14	432	0.997	0.81	21.12	19.29	21.36
74	11.11	683.4	1.68	0.84	13.84	11.87	14.24
75	11.11	671	1.6	0.87	14.46	12.79	14.61
76	11.11	686.4	1.81	0.83	13.53	10.82	13.98
77	8.33	515	1.05	0.85	18.56	19.19	19.19
78	7.14	435.2	1.15	0.84	21.53	17.17	21.94
79	11.11	648.9	1.7	0.84	14.54	11.70	14.20
80	10.00	639.3	1.18	0.82	14.46	16.52	15.46
81	8.33	489.5	1.04	0.85	19.53	19.38	19.19
82	8.33	515.7	1.05	0.85	18.43	19.08	19.07
83	8.00	487.6	1.06	0.90	20.80	20.17	21.20
84	9.09	544.4	1.11	0.83	17.00	17.58	17.03
85	9.09	539.7	1.09	0.82	17.07	17.81	16.95
86	10.00	576.3	1.12	0.79	15.44	16.75	14.88
87	8.00	520.5	1.05	0.85	18.37	19.19	19.98
88	8.70	530.8	0.964	0.83	17.59	20.41	17.95
89	9.52	563.6	1.18	0.80	16.01	16.11	15.84
90	9.09	548.5	1.1	0.83	16.94	17.80	17.09
91	7.69	637.7	1.06	0.87	15.25	19.34	21.15
92	10.00	593.1	1.27	0.81	15.23	14.99	15.11
93	10.00	582.5	1.26	0.82	15.81	15.41	15.41
94	10.00	591.9	1.22	0.73	13.78	14.09	13.64
95	10.00	512	1.2	0.72	15.87	14.27	13.59
96	11.11	649.3	1.36	0.80	13.89	13.98	13.58
97	6.67	399.5	0.837	0.74	20.81	20.94	20.86
98	11.11	667.3	1.5	0.80	13.47	12.63	13.53
99	11.11	655.3	1.43	0.81	13.80	13.33	13.61
100	11.11	653.1	1.46	0.81	13.90	13.11	13.66

เมื่อนำข้อมูลจาก Table 1 มาวาดเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากค่ามาตรฐานค่าคำนวณด้วย Ripple และ ค่าคำนวณด้วย V_{rms} ด้วยชุดข้อมูลทั้ง 100 ชุด จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 3 โดยมีค่าข้อมูลเชิงสถิติการวิเคราะห์แสดงใน Table 2 ค่า ripple ที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณหาค่าแรงบิดโดยใช้สมการ (1)

ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ค่าที่วัดได้จาก Figure 2

จะได้

$$V_{rms} = 1.29 \text{ V}, I_{rms} = 0.90 \text{ A} \text{ และ } F = 7.12 \text{ Hz}$$

** 6.305 คือค่า K สำหรับชุดตรวจวัดความสั่นสะเทือนที่ใช้ในการวิจัย

แทนค่าในสมการ (1)

$$T_{ripple} = \frac{0.90 \times 220 \times 0.85}{2 \times \pi(7.12 \times 6.305)}$$

$$T_{ripple} = 22.404 \text{ N.m}$$

จาก Figure 3 และข้อมูลใน Table 2 จะเห็นได้ว่า ค่าการวัดค่าแรงบิดจากการสั่นสะเทือนของสว่านไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าความถี่ Ripples ให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าแรงบิดมาตรฐาน และได้ดีกว่าการใช้ค่า V_{rms} ที่ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 93.56% เทียบกับ 82.63%

เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นกับค่าแรงดัน (V_{rms}) และความถี่ระลอกคลื่น (Ripples) ที่เกิดจากการวัดความถี่การสั่นสะเทือนสามารถอธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ดังแสดงด้วยสมการ (2)-(3)

$$V_{rms} = 4.44 f_{ripple} n \Phi \quad (2)$$

หรือ

$$V_{rms} = K f_{ripple} \quad (3)$$

เมื่อทำการทดลองวัดค่า V_{rms} เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ซ้ำ 300 ครั้ง ที่ค่า $f_{ripple} = 373.7 \text{ rpm}$ จะวัดค่า V_{rms} ได้เท่ากับเฉลี่ย 0.785 V และจะได้ว่า $K=6.305$ สำหรับชุดตรวจวัดความ

สั่นสะเทือนที่ใช้ในการวิจัยนี้ จึงได้ว่า สมการสำหรับการคำนวณค่าแรงบิดทางอ้อมตามสมการ (1)

เมื่อทำการทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร V_{rms} และ f_{ripple} โดยตรงกับการประมาณค่าแรงบิดเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่า ได้กราฟความสัมพันธ์ถดถอย (R^2) ดังแสดงใน Figure 4 และ Figure 5 ตามลำดับ

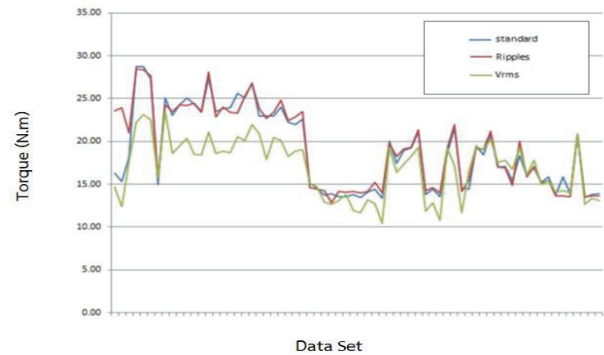


Figure 3 Torque results obtained from indirect measurements with the Ripple and V_{rms} values compared to the standard values

Table 2 The results of statistical analysis data obtained from the experiment

Torque (N.m)	Maximum	Minimum	Mean	Median	Standard Deviation
Standard	29.30	13.38	19.72	20.17	4.57
จากค่า Ripples	28.49	8.82	19.84	21.28	4.66
จากค่า V_{rms}	23.47	7.70	16.38	17.28	3.46

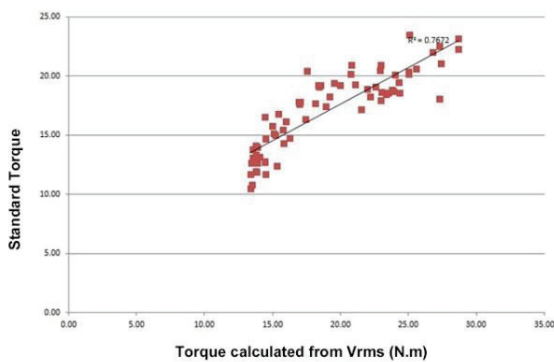


Figure 4 Shows the regression relationship between the torque obtained from the voltage measurement (V_{rms}) versus the standard torque

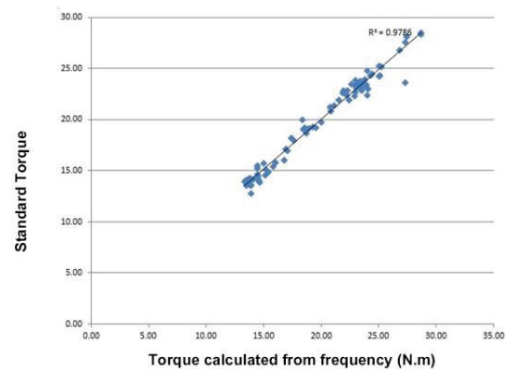


Figure 5 Shows the regression relationship between the torque obtained from Vibration frequency value measurement (f_{ripple}) versus the standard torque

จาก Figure 4-5 พบว่า ค่าแรงบิดด้วยการใช้ค่าแรงดัน V_{rms} เปรียบเทียบกับค่าแรงบิดมาตรฐานมีค่า $R^2 = 0.7672$ มีค่าร้อยละความผิดพลาดเฉลี่ย (%error) เท่ากับ 15.73% ในขณะที่เมื่อใช้ค่าความถี่การสั่นสะเทือน f_{ripple} ให้ค่า $R^2 = 0.9786$ มีค่าร้อยละความผิดพลาดเฉลี่ย (%error) เท่ากับ 0.66% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจริงที่ได้ในการวิจัยนี้ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การวัดค่าแรงบิดโดยอ้อมด้วยการใช้ค่าความถี่การสั่นสะเทือนของสว่างสามารถทำได้จริง โดยการใช้ค่าความถี่ในการคำนวณจะให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าการใช้ค่าแรงดัน rms ที่เกิดจากการสร้างแรงดันของอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. งานวิจัยนี้นำเสนอการวัดค่าแรงบิดโดยอ้อมโดยใช้คุณลักษณะการสั่นสะเทือนของสว่างไฟฟ้าขั้นสูง อุปกรณ์ทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของชุดทดลองและสว่างไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงสั่นสะเทือน และส่วนที่แสดงค่าเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วยอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ แคลมป์มีเตอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้า Tachometer วัดค่าแรงบิดมาตรฐานและความเร็วรอบ และออสซิลโลสโคปทำหน้าที่เก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนและตัวแปรวิเคราะห์จากการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้อง

2. การประมาณค่าแรงบิดโดยอ้อมจากการวัดค่าความสั่นสะเทือนสามารถทำได้จริง โดยอาศัยความสัมพันธ์สมการพลังงานและสมการตามกฎของฟาราเดย์ มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก (R^2 อยู่ในช่วง 0.7672-0.9786) และที่ค่าความถูกต้อง 84.27% สำหรับการใช้ค่าแรงดันกำเนิด rms การสั่นสะเทือน และ 99.34% สำหรับการใช้ค่าความถี่ระลอกคลื่นโดยตรงจากการสั่นสะเทือน ตามลำดับ

การศึกษาการวัดแรงบิดโดยอ้อมด้วยวิธีการที่นำเสนอในการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องได้ในอนาคต ซึ่งค่าแรงบิดที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับการประกอบชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งมีความแตกต่าง คณะผู้วิจัยจะได้นำเสนอในงานวิจัยในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ทำการทดลอง และอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- อนุชา วัฒนาภา, สุทธิพงษ์ โสภมา และพลศักดิ์ เลิศศิริบุญญา. (2553). *เขียนแบบวิศวกรรมพื้นฐาน = Fundamental of Engineering Drawing (พิมพ์ครั้งที่ 2)*. แมคกรอ-ฮิล.
- Alencar, M.C., et al. "Study development and characterization of micro torque transducer applied on screw elements analysis."
- Andrae, J. (2001). Measurement and calibration using reference and transfer torque flanges. *Proceedings of the 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements*. IMEKO TC3.
- British Standards Institution. (2008). *Constant Amplitude Force Calibration: Calibration of the calibration device instrumentation to be used for the dynamic calibration of non-resonant uniaxial dynamic testing systems. Method*. BritishStandards Institution.
- Dawkins, C., Thirukodikaval, N., Srinivasan & Whalley, J. (2001). "Calibration" *Handbook of econometrics*. Elsevier.
- Dib, A. (2012). *Sensorless indirect adaptive control with parameters and load-torque estimation of induction motor*. CCCA12.
- Freund, Jouni, Esa-Pekka, T. & Risto, T. (2000). Effects of two ergonomic aids on the usability of an in-line screwdriver. *Applied ergonomics*, 31(4), 371-376.
- Hetenyi, M. (1943). *A photoelastic study of bolt and nut fastenings*.
- NISHI, M. & NAKAMURA, S. (2004). Fundamental Engineering Drawing at Kanazawa Institute of Technology Relation of Mechanical Drawing and Engineering Drawing. *The Proceedings of the Technology and Society Conference* (pp. 13-16).
- Owen, P.J. & Cleary, P.W. (2009). Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*, 193(3), 274-288.
- Ozcan, E. (2004). A novel automated direct measurement method for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation. *Clinical biochemistry*, 37(4), 277-285.
- Pitipong, S., Pornjit, P. & Watcharin, P. (2010). An automated four-DOF robot screw fastening using visual servo. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. IEEE.

- Ranganath, Kate A., Colin Tucker Smith, and Brian A. Nosek. "Distinguishing automatic and controlled components of attitudes from direct and indirect measurement methods." *Journal of Experimental Social Psychology*, 44.2(2008), 386-396.
- Suzuki, T. (2020). Mechanical Low-Pass Filtering of Cells for Detection of Circulating Tumor Cells in Whole Blood. *Analytical chemistry*, 92(3), 2483-2491.
- Terrier, A., Kochbeck, S.H., Merlini, F., Gortchacow, M., Pioletti, D.P., & Farron, A. (2010). Tightening force and torque of nonlocking screws in a reverse shoulder prosthesis. *Clinical Biomechanics*, 25(6), 517-522.
- Vaez-Zadeh, S. (2018). *Direct Torque Control*. Oxford Scholarship Online.
- Zhao, H. (2013). *Vibration Torque Measurement And Mechanism Analysis of Rotary Stepping Motor*.
- Zribi, M. & Chiasson, J. (1991). Position control of a PM stepper motor by exact linearization. *IEEE Transactions on automatic control*, 36(5), 5620-625.