

การใช้คลื่นความถี่ สำหรับการพัฒนาระบบ โครงข่ายสมาร์ทกริดของประเทศไทย

RADIO FREQUENCY UTILIZATION
FOR THE DEVELOPMENT
OF SMART GRID IN THAILAND

วาทิต เบนจุฬกุล*

Watit Benjapolakul*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Chulalongkorn University,
Bangkok 10330 Thailand

Corresponding author E-mail: watit.b@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

ระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่รองรับความท้าทายด้านต่างๆ ในอนาคตของระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยเป็นการนำเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาใช้พัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความฉลาดทั้งนี้ระบบสื่อสารไร้สายมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ดังนั้นการจัดสรรคลื่นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดจึงเป็นประเด็นสำคัญ ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องพิจารณากำหนดแนวทางให้ชัดเจน บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะการใช้คลื่นความถี่สำหรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของประเทศไทย โดยศึกษาและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในต่างประเทศ เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียทางเทคนิคของการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน พิจารณาด้านทุนการลงทุนสร้างโครงข่ายไร้สายในสมาร์ตกริดที่ใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน รวมทั้งศึกษาและวิเคราะห์การใช้จ่ายความถี่สำหรับการใช้งานของ Application ต่างๆ ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ผลการศึกษาเสนอให้ใช้คลื่นความถี่สำหรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของประเทศไทยเป็น 3 แนวทางหลักๆ ได้แก่ 1) การใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed 2) การใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed และ 3) การใช้คลื่นความถี่ของผู้ประกอบกิจการโทรคมนาคม โดยพิจารณาการเลือกใช้ตามความสำคัญของข้อมูลและวัตถุประสงค์การใช้งานของ Application ต่างๆ ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด

คำสำคัญ : สมาร์ตกริด คลื่นความถี่ การจัดสรรคลื่นความถี่

Abstract

Smart grid is an advanced technology to address the challenges of future power grid. Smart grid utilizes information and communication technology to make the power grid smart. Wireless communications play an important role to support machine-to-machine communications in smart grid, therefore, an appropriate frequency allocation for smart grid development is a crucial issue that must be considered and clearly defined by all relevant parties. The objective of this paper is to study and develop recommendation for a guideline of radio frequency utilization for the development of smart grid in Thailand, by studying and analyzing radio frequency utilization strategies for smart grid in various countries, comparing technical advantages and disadvantages of radio frequency utilization in different frequency bands, considering smart grid wireless network investment costs of utilizing frequency in different frequency bands, and studying and analyzing radio frequency utilization for various smart grid applications in various frequency bands. The results of this study suggest the following three approaches of radio frequency utilization for the development of smart grid in Thailand: 1) the use of unlicensed frequency, 2) the use of licensed frequency, and 3) the use of radio frequency of telecommunication operators who have licenses, by considering the importance of data and the objective of various smart grid applications.

Keywords : Smart grid, Radio frequency, Frequency allocation

1. บทนำ

โครงข่ายสมาร์ตกริดเป็นการประยุกต์การทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์จำนวนมาก เพื่อพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความฉลาด สามารถบริหารจัดการระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพสูงสุด รวมทั้งรองรับความท้าทายต่างๆ เช่น ความต้องการไฟฟ้าที่สูงขึ้น การเติบโตของแหล่งพลังงานหมุนเวียน การใช้ยานยนต์ไฟฟ้า รวมไปถึงการเปิดโอกาสให้ผู้บริโภคสามารถบริหารจัดการการใช้ไฟฟ้าในแต่ละวันได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการเชื่อมโยงข้อมูลภายในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถรับรู้ข้อมูลและสถานะต่างๆ ที่เกิดขึ้นครอบคลุมทั่วทั้งระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทำให้เกิดการส่งผ่านข้อมูลจำนวนมากในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ทั้งนี้เทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายเป็นที่นิยมจึงนำมาใช้ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด เนื่องจากมีความคล่องตัวและมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีคุณสมบัติความเหมาะสมในการใช้งานและลักษณะการใช้คลื่นความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการจัดสรรคลื่นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดจึงเป็นประเด็นที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายเป็นปัจจัยสำคัญของระบบสื่อสารข้อมูลจำนวนมากของทุกภาคส่วน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการใช้คลื่นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์

แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 มาตรา 52 (2)

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา วิเคราะห์ และให้ข้อเสนอแนะ การใช้คลื่นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ของประเทศไทย

3. วิธีวิจัย

บทความนี้เป็นการวิจัยเอกสาร (Documentary research) โดยศึกษาตัวอย่างการใช้คลื่นความถี่ สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในต่างประเทศ (เนเธอร์แลนด์ นอร์เวย์ สหรัฐอเมริกา จีน เวียดนาม เกาหลีใต้ และสิงคโปร์) วิเคราะห์เหตุผลของการเลือกใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในแต่ละประเทศ เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียทางเทคนิคของการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ ศึกษาการใช้ย่านความถี่ให้สอดคล้อง กับความต้องการใช้งานของแอปพลิเคชันต่างๆ ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด พิจารณาด้านทุนการลงทุนสร้าง โครงข่ายไร้สายในสมาร์ตกริดจากการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ต่างกัน ตลอดจนการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) โดยศึกษาความต้องการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของการไฟฟ้าในประเทศไทย รวมทั้งการจัดสรรคลื่นความถี่ของ กสทช. ทั้งในรูปแบบของการจัดทำแบบสอบถาม การประชุม และการจัดสัมมนา เพื่อรวบรวมข้อมูล แนวคิด และข้อคิดเห็นต่างๆ จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย สุดท้ายผู้เขียนได้นำ ผลการศึกษาวิจัยที่ได้ข้างต้นมาวิเคราะห์ผลของข้อมูล เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะในการใช้คลื่นความถี่ที่เหมาะสม สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของประเทศไทย

4. การใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในต่างประเทศ

4.1 ประเทศเนเธอร์แลนด์

บริษัท Alliander ซึ่งเป็นผู้ให้บริการระบบจำหน่ายไฟฟ้าและก๊าซขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้พัฒนาระบบสมาร์ตมิเตอร์เพื่อรองรับการวัดและควบคุมมิเตอร์ไฟฟ้า มิเตอร์ก๊าซ และระบบไฟฟ้าแสงสว่าง สาธารณะ โดยเลือกใช้ระบบสื่อสารเทคโนโลยี CDMA450 (Code Division Multiple Access)

ซึ่งบริษัท Alliander ได้รับสิทธิในการใช้คลื่นความถี่จากบริษัท KPN ซึ่งเป็นผู้ให้บริการโทรคมนาคม ที่ได้รับใบอนุญาตใช้คลื่นความถี่ 450 MHz โดยทั้งสองบริษัทได้ร่วมกันพัฒนาโครงข่าย CDMA450 เพื่อรองรับ ระบบสมาร์ตมิเตอร์ดังกล่าว (CDG 450 Connectivity Special Interest Group, 2013)

บริษัท Alliander ได้ดำเนินการศึกษาความเหมาะสมของการใช้เทคโนโลยี CDMA450 สำหรับระบบสมาร์ตมิเตอร์ ซึ่งได้ข้อสรุปว่า CDMA450 เป็นตัวเลือกเชิงกลยุทธ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากใช้เทคโนโลยี Spread Spectrum จึงมีความปลอดภัยและสมรรถนะสูง อีกทั้งสามารถรองรับ Transmission Control Protocol (TCP) และ Point-to-Point Protocol (PPP) ซึ่งเหมาะสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์เนื่องจากมี Latency ต่ำ และรองรับ Quality of Service (QoS) นอกจากนี้ ย่านความถี่ 450 MHz รองรับระยะสื่อสารได้ไกลกว่าย่านความถี่สูง จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการบำรุงรักษาอุปกรณ์โครงข่ายลงได้ เนื่องจากมีจำนวนสถานีฐานน้อยกว่ากรณีที่ใช้ย่านความถี่สูง (Moll, 2013)

4.2 ประเทศนอร์เวย์

กรณีตัวอย่างโครงการสาธิตนำร่องของ Norwegian Smart Grid Center (NSGC) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การทดสอบระบบสมาร์ตมิเตอร์ โดยเลือกใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบ Radio Mesh บนย่านความถี่ 433-444 MHz และ 868 MHz (Unlicensed Band) สำหรับโครงข่าย Neighborhood Area Network (NAN) ซึ่งเป็นโครงข่ายสื่อสารระหว่างสมาร์ตมิเตอร์กับอุปกรณ์ Concentrator ส่วนในกรณีโครงข่าย Wide Area Network (WAN) ซึ่งเป็นโครงข่ายสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ Concentrator กับระบบ Head-end เลือกใช้โครงข่ายเซลลูลาร์ GPRS/EDGE (General Packet Radio Service/Enhanced Data for Global Evolution) ทั้งนี้ ผลลัพธ์จากโครงการนำร่องดังกล่าวพบว่า ระบบสื่อสารไร้สายแบบ Radio Mesh พบปัญหาสมรรถนะการทำงานที่ไม่ดีนักในบางพื้นที่ อีกทั้งการพึ่งพาโครงข่ายเซลลูลาร์ของผู้ให้บริการโทรคมนาคมส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมและบริหารจัดการโครงข่ายสื่อสารได้ (Sand et al., 2013)

เหตุผลที่ NSGC เลือกใช้ระบบสื่อสารไร้สายแบบ Radio Mesh บนย่านความถี่ 433-444 MHz และ 868 MHz สำหรับโครงข่าย NAN น่าจะเนื่องมาจากยังเป็นโครงการนำร่องและมีจำนวนสมาร์ตมิเตอร์เพียง 10,000 เครื่อง การขอใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ในส่วนของโครงข่าย WAN การเลือกใช้โครงข่ายเซลลูลาร์น่าจะเป็นเพราะต้องการลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการติดตั้งโครงข่ายสื่อสาร

4.3 ประเทศสหรัฐอเมริกา

ด้วยการที่เป็นประเทศขนาดใหญ่ และมีผู้ให้บริการไฟฟ้าจำนวนมากรับผิดชอบการให้บริการพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในประเทศสหรัฐอเมริกา จึงพบการใช้คลื่นความถี่ทั้งแบบ Licensed และ Unlicensed อย่างไรก็ตาม ผู้ให้บริการไฟฟ้าส่วนใหญ่มักเลือกใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed มากกว่า

การเลือกใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed แม้จะมีข้อได้เปรียบที่สามารถส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่สูงได้ อีกทั้งยังรับประกันความน่าเชื่อถือได้ และไม่ต้องกังวลถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตาม การขอ

ใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ในประเทศสหรัฐอเมริกามีค่าใช้จ่ายสูงมาก เนื่องจากคลื่นความถี่มีจำกัดและมีการแข่งขันสูงในกิจการโทรคมนาคม ผู้ให้บริการไฟฟ้าส่วนใหญ่จึงเลือกใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed บนย่านความถี่ 900 MHz สำหรับระบบสื่อสารของระบบ Advanced Metering Infrastructure (AMI) โดยมีเทคโนโลยีที่นิยมในการใช้งาน ได้แก่ Radio Frequency Mesh (RF Mesh) และ Zigbee ส่วนกรณีคลื่นความถี่แบบ Licensed จะเป็นลักษณะการใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์

4.4 ประเทศจีน

กรณีตัวอย่างจากการพัฒนาระบบ Distribution Automation (DA) ของ China Southern Grid (CSG) ซึ่งได้พิจารณาทางเลือกการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายทั้งในแง่ของประสิทธิภาพและความสามารถในการพัฒนาของเทคโนโลยี โดย CSG ตัดสินใจเลือกใช้ระบบ Enterprise Long Term Evolution (eLTE) ของบริษัท Huawei ซึ่งใช้เทคโนโลยี LTE Time-Division Duplex (LTE-TDD) บนย่านความถี่ 1800 MHz (Licensed Band) เนื่องจาก CSG มองว่าการเลือกใช้แพลตฟอร์มระบบสื่อสารแบบสำเร็จรูปจะช่วยลดปัญหาด้านการบูรณาการเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายได้ อีกทั้งแพลตฟอร์มดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการควบคุมและการตรวจวัดแบบอัตโนมัติสำหรับระบบ DA โดยเฉพาะ ดังนั้น CSG จึงสามารถควบคุมและบริหารจัดการโครงข่ายสื่อสารได้ทั้งหมด แตกต่างกับกรณีการใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งผู้ให้บริการไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมและบริหารจัดการโครงข่ายได้ (Feixiang, 2013)

4.5 ประเทศเวียดนาม

กรณีตัวอย่างโครงการนำร่องระบบ Automatic Meter Reading (AMR) จำนวน 2 โครงการ ได้แก่

1. โครงการนำร่องในจังหวัด Thái Nguyên เลือกใช้เทคโนโลยี RF Mesh บนย่านความถี่ 400 MHz (Unlicensed Band) สำหรับการเชื่อมโยงสมาร์ตมิเตอร์ไปยังอุปกรณ์ Concentrator (โครงข่าย NAN) และเลือกใช้โครงข่ายเซลลูลาร์ 3G/4G สำหรับการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ Concentrator กับศูนย์ข้อมูล (โครงข่าย WAN) ทั้งนี้ ระบบ AMR ในโครงการนี้ถือว่าไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากโครงข่ายสื่อสารไม่มีความเสถียรและมีความเชื่อถือต่ำ (Phuong, 2016)
2. โครงการนำร่องในบริเวณตอนกลางของประเทศเวียดนาม ระบบสื่อสารที่ใช้ในโครงข่าย NAN ถูกตั้งชื่อว่า RF Spider จากการใช้งานระบบ RF Mesh บนย่านความถี่ 408.925 MHz และ 433.050 MHz (Unlicensed Band) ส่วนโครงข่าย WAN เป็นการใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ GPRS/3G ระบบสื่อสารไร้สายในโครงการนี้สามารถทำงานได้เป็นอย่างดีและมีเวลาตอบสนองที่เพียงพอต่อการทำงาน (Thien Le et al., 2017)

จากกรณีตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่า ทั้ง 2 โครงการเลือกใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed สำหรับโครงข่าย NAN เช่นเดียวกัน เนื่องจากระบบ AMR มีขนาดเล็กไม่ใหญ่นักจึงยังไม่มีความต้องการใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed นอกจากนี้ ทั้ง 2 โครงการยังเลือกใช้ย่านความถี่ 400 MHz ซึ่งมีระยะสื่อสารที่ไกลและทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดี แม้จะรองรับอัตราข้อมูลได้ต่ำแต่ระบบ AMR ไม่ได้มีความต้องการด้านอัตราข้อมูลมากนัก อย่างไรก็ตาม แม้ว่าทั้ง 2 โครงการจะใช้เทคโนโลยีระบบสื่อสารแบบเดียวกัน แต่ระบบ AMR ของโครงการที่ 2 สามารถทำงานได้ดีต่างจากโครงการแรกที่ประสบปัญหาอย่างมาก เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายสื่อสารของโครงการที่ 2 มีการพิจารณาจำนวน Hop และระยะห่างระหว่าง Hop เป็นอย่างดี

4.6 ประสิทธิภาพที่ดี

กรณีตัวอย่างจากโครงการทดสอบด้านระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดที่เกาะเชจู ซึ่งเป็นการทดสอบที่รวม Ecosystem ทั้งหมดของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด อย่างไรก็ตาม การใช้งานระบบสื่อสารไร้สายในโครงการนี้อยู่ที่ระบบ AMI และบริการด้านการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านเป็นหลัก

โครงข่าย Home Area Network (HAN) เพื่อเชื่อมโยงการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านเลือกใช้เทคโนโลยี Zigbee บนย่านความถี่ 2.4 GHz (Unlicensed Band) โดยพิจารณาจากข้อดีของเทคโนโลยี Zigbee ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานต่ำ จึงเหมาะสมกับระบบสื่อสารในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ภายในบ้านที่มีระยะทางสื่อสารค่อนข้างสั้น รวมทั้งยังเลือกใช้โครงข่าย Zigbee Mesh สำหรับโครงข่าย NAN เพื่อความสะดวกต่อการพัฒนาระบบสื่อสารบนมาตรฐานเดียวกัน ในส่วนของโครงข่าย WAN โครงการนี้มีการทดสอบ 2 เทคโนโลยี ได้แก่ โครงข่ายเซลล์ลูลาร์ WCDMA (Wideband CDMA) และโครงข่าย Wireless Broadband (WiBro) หรือ Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax) ซึ่งทั้ง 2 เทคโนโลยีใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ในลักษณะการใช้บริการโครงข่ายของผู้ให้บริการโทรคมนาคม ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการติดตั้งโครงข่ายสื่อสาร โดยที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าจะถูกเรียกเก็บค่าบริการจากผู้ให้บริการโทรคมนาคม (Changmin, 2012)

4.7 ประสิทธิภาพสูง

กรณีตัวอย่างจากโครงการทดสอบระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดแบบไร้สายที่ Singapore University of Technology and Design (SUTD) โดยแอปพลิเคชันที่นำมาทดสอบในโครงการนี้นั้นเน้นไปที่แอปพลิเคชันด้านการบริหารจัดการพลังงานในอาคาร เช่น Demand Response และการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เพื่อประหยัดพลังงาน โดยเลือกใช้เทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายแบบ Unlicensed เช่น Z-Wave, Zigbee และ WiFi (Wireless Fidelity) สำหรับโครงข่ายสื่อสารของอุปกรณ์ภายในอาคารและหอพักบุคลากร ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้เป็นที่นิยมสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในบ้านหรืออาคาร เนื่องจากการใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed จึงสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องขออนุญาต และรองรับการทำงานในสภาวะแวดล้อมในอาคารได้อย่างเพียงพอ อีกทั้งอุปกรณ์ส่วนใหญ่ในตลาดมักรองรับเทคโนโลยีเหล่านี้ (Tushar et al., 2016)

5. การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียทางเทคนิค ของการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน

5.1 การเปรียบเทียบคลื่นความถี่แบบ Licensed กับคลื่นความถี่แบบ Unlicensed

ปัจจุบันยังมีข้อถกเถียงมากมายเกี่ยวกับเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่เหมาะสมสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด โดยเฉพาะความเหมาะสมระหว่างการใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed กับแบบ Unlicensed ทั้งนี้ Sensus USA Inc. (2011) ได้อธิบายข้อดีและข้อเสียทางเทคนิคของการใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed และแบบ Unlicensed ในมุมมองของพารามิเตอร์ที่สำคัญของโครงข่ายสื่อสารไร้สาย สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคลื่นความถี่แบบ Licensed กับคลื่นความถี่แบบ Unlicensed

พารามิเตอร์	คลื่นความถี่แบบ Licensed	คลื่นความถี่แบบ Unlicensed
ความเชื่อถือได้ (Reliability)	ความเชื่อถือได้สูงมาก เนื่องจากเป็นคลื่นความถี่เฉพาะสำหรับผู้ได้รับใบอนุญาต	อาจเกิดผลกระทบในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนสูงกับโครงข่ายอื่นๆ
ความพร้อมใช้งาน (Availability)	ความพร้อมใช้งานสูงมาก เนื่องจากใช้งานได้เฉพาะผู้ได้รับใบอนุญาต	อาจเกิดปัญหาด้านความพร้อมใช้งานในบางช่วงเวลา
Latency	ค่า Latency ต่ำ และสามารถวัดค่าได้	Latency อาจมีค่าสูง และมีความผันผวนที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้
แบนด์วิธ	จำกัดการใช้งานเฉพาะช่องสัญญาณที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น	สามารถใช้งานช่องสัญญาณได้อย่างอิสระ
พื้นที่ครอบคลุม	รองรับระยะสื่อสารได้ไกล เนื่องจากสามารถใช้กำลังส่งได้สูง	ระยะสื่อสารจำกัดเนื่องจากถูกจำกัดกำลังส่ง
การลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐาน	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ เนื่องจากมีระยะสื่อสารไกล	จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรืออุปกรณ์ส่งต่อสัญญาณ ทำให้การลงทุนสูง
ความปลอดภัย (Security)	มีการควบคุมความปลอดภัยในชั้นกายภาพ และนโยบายความปลอดภัย	มีความปลอดภัยต่ำกว่า โดยขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีสื่อสารที่ใช้
คุณภาพของสัญญาณ	สามารถรับประกันค่า Signal to Noise Ratio (SNR)	มีโอกาสเกิดการรบกวนกับผู้อื่น

ที่มา : ข้อมูลจากการศึกษาและวิจัยของ วาทีต เบญจพลกุล

5.2 การเปรียบเทียบการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน

การพิจารณาเลือกใช้คลื่นความถี่และเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดมีความสำคัญที่สุดในโครงข่าย NAN และโครงข่าย FAN (Field Area Network) เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ปลายทางจำนวนมากซึ่งกระจายตามพื้นที่ต่างๆ โดยเฉพาะพื้นที่เขตเมืองที่มีการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ อย่างหนาแน่น ดังนั้นการพิจารณาข้อดีข้อเสียทางเทคนิคของการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน

ในบทความนี้จะพิจารณาในมุมมองของโครงข่าย NAN/FAN เป็นหลัก โดยวิเคราะห์จากแนวทางการประเมินระบบสื่อสารไร้สายสำหรับระบบโครงข่ายสมรรถกิริตของ National Institute of Standards and Technology (2014) สรุปผลได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเทคนิคของการใช้คลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่างกัน

พารามิเตอร์	รายละเอียด
การสูญเสียตามเส้นทาง (Path Loss)	ในกรณีที่กำลังส่งเท่ากัน สัญญาณความถี่ต่ำมี Path Loss ต่ำกว่าสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นระบบโครงข่ายสมรรถกิริตมักเลือกใช้ย่านความถี่ต่ำ
การสูญเสียจากการแพร่กระจายสัญญาณผ่านสิ่งกีดขวาง (Penetration Loss)	สัญญาณความถี่ต่ำมี Penetration Loss ต่ำกว่าสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นในระบบ AMI ซึ่งสมรรถกิริตส่วนใหญ่ติดตั้งอยู่ภายในบ้านหรืออาคาร การใช้ย่านความถี่ต่ำจึงมีความเหมาะสมมากกว่า
การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Absorption)	ที่ความถี่ต่ำกว่า 6 GHz ณ สภาวะแวดล้อมบนพื้นผิวโลก การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการส่งสัญญาณวิทยุ ดังนั้นประเด็นนี้จึงไม่มีผลต่อการพิจารณาเลือกย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมรรถกิริต
สัญญาณรบกวน (Noise)	สัญญาณรบกวน (Noise) ตามธรรมชาติมีกำลังสม่ำเสมอตลอดทุกย่านความถี่ ประเด็นด้าน Noise จึงไม่มีผลกระทบต่อการพิจารณาเลือกย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมรรถกิริต
การรบกวนจากสัญญาณอื่น (Interference)	ปัญหาการรบกวนกับระบบสื่อสารไร้สายอื่นๆ อาจส่งผลกระทบต่อระบบโครงข่ายสมรรถกิริตทำงานผิดพลาดหรือไม่เต็มประสิทธิภาพได้ ผลกระทบของการรบกวนจากสัญญาณอื่นในย่านความถี่ต่างๆ สรุปได้ดังนี้ 433 MHz: มีผลกระทบต่ำที่สุด เนื่องจากเทคโนโลยีแบบ Unlicensed ไม่นิยมใช้งานย่านความถี่นี้ 868/900 MHz: มีผลกระทบค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นย่านความถี่ใช้งานของเทคโนโลยีแบบ Unlicensed จำนวนมาก 2.4 GHz: มีผลกระทบสูงที่สุด เนื่องจากเป็นย่านที่เทคโนโลยีแบบ Unlicensed นิยมใช้งานมาก เช่น WiFi, Zigbee และ Bluetooth 5 GHz: ยังไม่มีผลกระทบมากนัก แต่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการย้ายมาจากย่าน 2.4 GHz ของเทคโนโลยี WiFi

ที่มา : ข้อมูลจากการศึกษาและวิจัยของ วาทีต เบญจพลกุล

6. ย่านความถี่สำหรับการใช้งานของแอปพลิเคชันต่างๆ ในระบบโครงข่ายสมรรถกิริต

Berger & Iniewski (2012) แบ่งโครงสร้างระบบสื่อสารสำหรับโครงข่ายสมรรถกิริตออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ โครงข่ายในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า โครงข่าย NAN/FAN และโครงข่าย WAN โดยแบ่งตามอัตราข้อมูลและระยะสื่อสารที่ครอบคลุม ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายความต้องการด้านระบบสื่อสารของแอปพลิเคชันต่างๆ ตามโครงสร้างระบบสื่อสารข้างต้น ซึ่งอาจแตกต่างกันไปในแต่ละกรณีของการพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริตของผู้ให้บริการไฟฟ้าแต่ละราย ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการแสดงความต้องการด้านระบบสื่อสารของแอปพลิเคชันต่างๆ ในบริบทของตัวอย่างการใช้งานทั่วไปเท่านั้น

6.1 แอปพลิเคชันในโครงข่ายในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า

โครงข่ายในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า (Premise Network) หรือโครงข่าย HAN/BAN/IAN (Home Area Network/Building Area Network/Industrial Area Network) เป็นจุดสิ้นสุดของโครงข่ายสื่อสารสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด โดยเป็นโครงข่ายที่สนับสนุนการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานที่ของผู้ใช้ไฟฟ้า ตัวอย่างแอปพลิเคชันดังกล่าว เช่น ระบบอัตโนมัติภายในบ้าน ระบบบริหารจัดการโหลดและค่าไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งโดยทั่วไปโครงข่ายต้องการเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายที่สามารถรองรับอัตราข้อมูลประมาณ 100 kbps และระยะสื่อสาร 100 เมตร เช่น ZigBee WiFi Z-Wave และ Bluetooth ฯลฯ

6.2 แอปพลิเคชันในโครงข่าย NAN

โครงข่าย NAN เป็นโครงข่ายที่สนับสนุนการสื่อสารข้อมูลระหว่างโครงข่าย WAN กับโครงข่ายในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งในบางครั้งอาจเรียกว่าโครงข่าย FAN หากมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภาคสนาม เช่น อุปกรณ์ Intelligent Electronic Device (IED) โครงข่าย NAN/FAN ถือเป็นส่วนสำคัญในการรองรับการทำงานของแอปพลิเคชันจำนวนมากในระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด เช่น ระบบสมาร์ทมิเตอร์/AMI, ระบบ Distribution Automation, การบริหารจัดการและกู้ไฟดับ (Outage Management) ฯลฯ โดยทั่วไปโครงข่าย NAN/FAN ต้องการเทคโนโลยีสื่อสารที่สนับสนุนอัตราข้อมูลตั้งแต่ 100 kbps-10 Mbps และระยะสื่อสารตั้งแต่ 100 เมตร - 10 กิโลเมตร เช่น ZigBee Mesh WiFi Mesh WiMax และ Cellular เป็นต้น

6.3 แอปพลิเคชันในโครงข่าย WAN

โครงข่าย WAN สนับสนุนการทำงานแบบเรียลไทม์ของแอปพลิเคชันด้านการตรวจสอบ ควบคุม และป้องกันในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นข่ายสื่อสารสำหรับโครงข่ายสื่อสารหลักของระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด ซึ่งครอบคลุมระยะทางไกลจากโครงข่าย NAN/FAN ไปจนถึงศูนย์ควบคุมของผู้ให้บริการไฟฟ้า ดังนั้นโครงข่าย WAN ต้องการเทคโนโลยีระบบสื่อสารที่สนับสนุนอัตราข้อมูลที่สูงมาก เช่น 10 Mbps-1 Gbps และระยะสื่อสารที่ไกลมาก เช่น 10-100 กิโลเมตร ดังนั้นผู้ให้บริการไฟฟ้าจึงนิยมใช้งานโครงข่าย Optical Fiber มากกว่าระบบสื่อสารไร้สาย

7. ต้นทุนการลงทุนของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด จากการใช้คลื่นความถี่ต่างกัน

7.1 กรณีศึกษาที่ 1: การเปรียบเทียบต้นทุนการลงทุน ระหว่างคลื่นความถี่ 450 MHz กับ 900 MHz

450 Alliance.org (2014) ได้ศึกษาต้นทุนการลงทุนของระบบสมาร์ตมิเตอร์ของคลื่นความถี่ 450 MHz และ 900 MHz โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าเป็นผู้ลงทุนสร้างโครงข่าย CDMA คลื่นความถี่ 450 MHz (CDMA450) กับกรณีที่ให้บริการโครงข่าย GPRS คลื่นความถี่ 900 MHz (GPRS900) ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยพิจารณาจากต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของ (Total Cost of Ownership) ในระยะเวลา 15 ปี สรุปผลการศึกษาพบว่าต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของของการลงทุนสร้างโครงข่าย CDMA450 อยู่ที่ 62 EUR ต่อจุดเชื่อมต่อ ส่วนการใช้บริการโครงข่าย GPRS900 อยู่ที่ 154 EUR ต่อจุดเชื่อมต่อ

ทั้งนี้ การลงทุนสร้างโครงข่าย CDMA450 จะมีต้นทุนในการลงทุน (Network CAPEX (Capital Expenditure)) และค่าโมดูลสื่อสารของอุปกรณ์ปลายทาง (Comms Module) สูงกว่าการใช้บริการโครงข่าย GPRS900 ซึ่งไม่มีต้นทุนในการลงทุนสร้างโครงข่ายเนื่องจากการใช้บริการโครงข่ายของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการใช้งานโครงข่าย (Network OPEX (Operating Expense)) การใช้บริการโครงข่าย GPRS จะถูกเรียกเก็บค่าบริการจากผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่การสร้างโครงข่าย CDMA450 มีเพียงค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์เท่านั้น ซึ่งจากการใช้คลื่นความถี่ 450 MHz ที่มีระยะสื่อสารได้ไกลจึงช่วยลดความจำเป็นในการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่าย ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณา Total Cost of Ownership ในระยะยาว กรณีที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าลงทุนสร้างโครงข่าย CDMA450 ด้วยตนเองจะมีความคุ้มค่ากว่าการใช้บริการโครงข่าย GPRS900

7.2 กรณีศึกษาที่ 2: เปรียบเทียบระหว่าง 3G / GPRS / RF Mesh / PLC

Qualcomm (2012) ได้วิเคราะห์ Total Cost of Ownership ของการพัฒนาระบบสมาร์ตมิเตอร์เปรียบเทียบระหว่างการเลือกใช้เทคโนโลยีระบบสื่อสารแบบต่างๆ ได้แก่ การใช้บริการโครงข่าย 3G และ GPRS ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ การลงทุนสร้างโครงข่ายแบบไร้สาย RF Mesh (คลื่นความถี่ 900 MHz) และการลงทุนโครงข่ายแบบมีสาย Power Line Communication (PLC) โดยทั้ง 4 เทคโนโลยีข้างต้นจะเปรียบเทียบกันด้วยค่าต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของต่อสมาร์ตมิเตอร์ 1 เครื่อง (USD/มิเตอร์) ภายใต้อายุการใช้งาน 25 ปี สรุปผลการศึกษาพบว่าต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของของการใช้บริการโครงข่าย 3G และ GPRS อยู่ที่ 175 USD และ 167 USD ตามลำดับ ส่วนกรณีลงทุนสร้างโครงข่าย RF Mesh และ PLC ด้วยตนเองอยู่ที่ 226 USD และ 191 USD ตามลำดับ

Total Cost of Ownership ของระบบสมาร์ตมิเตอร์ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการสร้างโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารและค่าอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ รวมกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการใช้บริการศูนย์ข้อมูล ค่าบริการเชื่อมต่อ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการ (Overhead) ในกรณีที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าเลือกใช้บริการโครงข่าย 3G หรือ GPRS ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่จะเรียกเก็บค่าบริการเชื่อมต่อ ซึ่งกรณีการสร้างโครงข่ายของตนเองจะไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้บริการโครงข่าย 3G และ GPRS เนื่องจากค่าใช้จ่ายส่วนนี้ถูกรับผิดชอบโดยผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการให้บริการ

7.3 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาต้นทุนการลงทุนของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในหัวข้อที่ 7.1 และ 7.2 จะเห็นว่า Total Cost of Ownership ของทั้ง 2 กรณีมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากกรณีในหัวข้อที่ 7.2 คิดที่ระยะเวลา 25 ปี และยังรวมต้นทุนค่าอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ไว้ด้วย ส่วนกรณีในหัวข้อที่ 7.1 คิดที่ระยะเวลา 15 ปี และคิดเพียงค่าโมดูลสื่อสารเท่านั้น นอกจากนี้ ทั้ง 2 กรณียังมีบริบทอื่นๆ ที่แตกต่างกัน เช่น อัตราค่าบริการที่ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในแต่ละประเทศเรียกเก็บ และจำนวนจุดเชื่อมต่อ ฯลฯ ส่งผลให้ผลการศึกษาของทั้ง 2 กรณีมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ กรณีแรกได้ผลว่า ต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของของการลงทุนสร้างโครงข่าย CDMA450 ต่ำกว่าการใช้บริการโครงข่าย GPRS900 ส่วนกรณีที่ 2 พบว่า ต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของของการใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ต่ำกว่าการลงทุนสร้างโครงข่ายด้วยตนเอง อย่างไรก็ตาม การที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าเป็นผู้ลงทุนสร้างโครงข่ายสื่อสารด้วยตนเองมีข้อได้เปรียบที่สำคัญในแง่ของความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและความสามารถในการบริหารจัดการโครงข่าย ซึ่งเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด โดยหากพิจารณาต้นทุนการลงทุนเฉพาะกรณีที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าลงทุนสร้างโครงข่ายสื่อสารพบว่า การเลือกใช้ย่านความถี่ต่ำมีแนวโน้มที่จะมีต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของต่ำกว่าการเลือกใช้ย่านความถี่สูง เนื่องจากคลื่นวิทยุความถี่ต่ำมีระยะทางสื่อสารไกล จึงช่วยลดต้นทุนค่าอุปกรณ์และการบำรุงรักษาลงได้

การศึกษาข้างต้นเป็นการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของที่ยังไม่อยู่บนฐานเปรียบเทียบเดียวกันมากนัก เช่น เป็นกรณีศึกษาจากประเทศที่ต่างกัน ต้นทุนของอุปกรณ์มีความแตกต่างกัน อีกทั้งจำนวนจุดเชื่อมต่อและความต้องการด้านระบบสื่อสารยังมีความแตกต่างกัน กรณีศึกษาข้างต้นจึงมีลักษณะเป็นตัวอย่างและแนวทางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนการลงทุนของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดจากการใช้คลื่นความถี่ต่างกันต่อไป ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจำเป็นต้องอยู่บนบริบทของประเทศไทย และมีการพิจารณาร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถประเมินต้นทุนได้อย่างถูกต้อง

8. การใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ของกรไฟฟ้าทั้งสามในประเทศไทย

8.1 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีแผนดำเนินโครงการนำร่องระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในพื้นที่ อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน ซึ่งมุ่งเน้นไปที่แอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการและการควบคุมระบบไฟฟ้า จึงเลือกใช้ระบบสื่อสารแบบมีสายเป็นหลัก และใช้ระบบสื่อสารไร้สายสำหรับรองรับการรับส่งข้อมูลการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้าเท่านั้น โดยเลือกใช้โครงข่ายเซลลูลาร์ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ สำหรับแผนการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของ กฟผ. ในอนาคตส่วนใหญ่ยังคงพิจารณาการใช้ระบบสื่อสารแบบมีสาย โดยอาจจำเป็นต้องใช้งานระบบสื่อสารไร้สายสำหรับ Demand Response และระบบ RE (Renewable Energy) Forecast ซึ่งปัจจุบันยังอยู่ระหว่างการศึกษาโครงการจึงยังไม่มีแผนวางแผนออกแบบระบบสื่อสาร อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของ กฟผ. ยังจำเป็นต้องใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed เนื่องจากการรับส่งข้อมูลปฏิบัติการด้านการผลิตและส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในประเทศ

8.2 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) มีแผนนำร่องพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในพื้นที่เมืองพัทยา จ.ชลบุรี การใช้คลื่นความถี่ในโครงการดังกล่าว ได้แก่ โครงข่าย RF (Unlicensed) และโครงข่ายเซลลูลาร์ เพื่อรองรับการสื่อสารสำหรับระบบ AMI นอกจากนี้ กฟภ. ยังมีการใช้งานคลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชันระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดอื่นๆ เช่น ระบบ AMR สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ทั่วประเทศ ซึ่งใช้งานโครงข่ายเซลลูลาร์ GPRS/3G และระบบ SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) ซึ่งใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ในย่าน 450-470 MHz และ 470-510 MHz สำหรับแผนการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของ กฟภ. ในอนาคตมีความต้องการใช้คลื่นความถี่จำนวนมากเพื่อรองรับแผนขยายระบบสมาร์ตมิเตอร์และการนำมาตรการ Demand Response มาใช้กับผู้ไฟฟ้าของ กฟภ. ทั่วประเทศ ดังนั้นโครงข่ายสื่อสารไร้สายที่เชื่อมโยงกับผู้ไฟฟ้าจึงต้องมีความเชื่อถือได้ ความพร้อมใช้งาน และความปลอดภัย ซึ่ง กฟภ. เห็นว่าควรมีการจัดสรรย่านความถี่แบบ Licensed เพื่อรองรับการใช้งานดังกล่าว

8.3 การไฟฟ้านครหลวง

การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีแผนนำร่องพัฒนาระบบ AMI ที่ใช้คลื่นความถี่ ได้แก่ โครงข่าย RF (Unlicensed) และโครงข่ายเซลลูลาร์ นอกจากนี้ กฟน. ยังมีการใช้ระบบสื่อสารไร้สายสำหรับแอปพลิเคชันอื่นๆ เช่น ระบบ Field Force Management ซึ่งใช้โครงข่ายเซลลูลาร์เป็นระบบสื่อสาร ระบบ Digital Trunked

ซึ่งใช้งานย่านความถี่ 800 MHz สำหรับเครื่องวิทยุสื่อสาร ฯลฯ สำหรับแผนการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของ กฟน. ในอนาคตมีความต้องการใช้คลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้ไฟฟ้า และการควบคุมระบบไฟฟ้า โดยวางแผนใช้งานระบบสื่อสารไร้สายแบบ Unlicensed สำหรับแอปพลิเคชันที่เป็น Non-critical Infrastructure ส่วนแอปพลิเคชันที่เป็น Critical Infrastructure จะเลือกใช้โครงข่าย Optical Fiber เป็นระบบสื่อสารหลัก อย่างไรก็ตาม กฟน. ยังมีข้อกังวลเกี่ยวกับปัญหาการรบกวนของสัญญาณในการใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed โดยเฉพาะจากเทคโนโลยี WiFi บนย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz ซึ่งมีการใช้งานที่หนาแน่นอย่างมากในกรุงเทพมหานคร จึงอาจส่งผลกระทบต่อระบบการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดได้ โดย กฟน. ได้จัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed ซึ่งจะสามารถช่วยรองรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดได้ดียิ่งขึ้น

9. แนวทางการจัดสรรคลื่นความถี่ของ กสทช. ให้กับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด

9.1 กรณีคลื่นความถี่แบบ Unlicensed

จากข้อกำหนดของ กสทช. คลื่นความถี่ที่สามารถใช้งานเพื่อรองรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด โดยได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต สรุปลำดับดังตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาแนวโน้มการใช้งานแล้ว การใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed น่าจะอยู่ที่ 4 ย่านความถี่ ได้แก่ 433 MHz, 920-925 MHz, 2.4-2.5 GHz และ 5 GHz เนื่องจากอุปกรณ์ระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในตลาดส่วนใหญ่เลือกใช้ใช้งานย่านความถี่เหล่านี้ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่พบการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ

ตารางที่ 3 คลื่นความถี่ที่ กสทช. อนุญาตให้ใช้โดยได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต

คลื่นความถี่	กำลังส่งสูงสุด (EIRP)
13.553-13.567 MHz	10 mW
26.965-27.405 MHz	100 mW
30-50 MHz	10 mW
54-74 MHz	10 mW
300-500 MHz	10 mW
920-925 MHz	500 mW
2400-2500 MHz	100 mW
5150-5350 MHz	200 mW
5470-5850 MHz	1 W

ที่มา: ข้อมูลจากสำนักงาน กสทช. (EIRP = Effective Isotropic Radiated Power)

9.2 กรณีคลื่นความถี่แบบ Licensed

สำนักงาน กสทช. ยังไม่มีนโยบายจัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed เพื่อใช้ในการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดเป็นการเฉพาะ แต่การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง สามารถแสดงความจำนงขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed ในบางย่านความถี่ที่ถูกกำหนดไว้ให้กับกิจการที่ระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดสามารถใช้งานได้ เช่น กิจการประจำที่และกิจการเคลื่อนที่

การใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ต้องเป็นไปตามแผนความถี่ที่กำหนดไว้สำหรับกิจการประจำที่และกิจการเคลื่อนที่ ทั้งนี้ การจัดสรรคลื่นความถี่เพื่อใช้ในการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด สำนักงาน กสทช. จะพิจารณาถึงความจำเป็นในหลายด้าน เช่น การใช้งานคลื่นความถี่ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ความเหมาะสมของการเลือกใช้คลื่นความถี่ให้เหมาะสมกับการใช้งานและเทคโนโลยี โอกาสในการใช้คลื่นความถี่ร่วมกับหน่วยงานที่มีการใช้งานในลักษณะใกล้เคียงกัน ความมั่นคงของโครงข่าย รวมไปถึงคุณภาพ ความเร็ว และปริมาณของการส่งข้อมูลตามความต้องการของการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง

10. ความสำคัญของข้อมูลในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด

การพิจารณาเทคโนโลยีระบบสื่อสารที่เหมาะสมกับแต่ละแอปพลิเคชันในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด นอกจากการพิจารณาความต้องการด้านระบบสื่อสารแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความสำคัญของข้อมูลในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ซึ่งอาจแบ่งความสำคัญของข้อมูลได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Non-critical: ได้แก่ ข้อมูลของแอปพลิเคชันที่ไม่เกี่ยวข้องกับงานด้านปฏิบัติการและการควบคุมสั่งการภายในระบบไฟฟ้า เช่น ข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ใช้ไฟฟ้า รวมไปถึงข้อมูลการสั่งการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าหลัก เช่น การสั่งการเกี่ยวกับ Demand Response ระบบกักเก็บพลังงานในระดับผู้ใช้ไฟฟ้า และสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ฯลฯ
2. Critical: ได้แก่ ข้อมูลของแอปพลิเคชันในงานด้านปฏิบัติการและการควบคุมสั่งการภายในระบบไฟฟ้า และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าหลัก ซึ่งหากการสื่อสารข้อมูลของแอปพลิเคชันเหล่านี้เกิดความผิดพลาด อาจส่งผลกระทบต่อการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นการใช้ระบบสื่อสารไร้สายสำหรับแอปพลิเคชันเหล่านี้ควรเป็นลักษณะคลื่นความถี่แบบ Licensed เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นด้านความเชื่อถือได้ (Reliability) ความพร้อมใช้งาน (Availability) และความปลอดภัย (Security)

จากการกำหนดความสำคัญของข้อมูลในระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดข้างต้น ผู้เขียนได้นำแนวทางดังกล่าวมาวิเคราะห์ความสำคัญของข้อมูลเพื่อจัดทำข้อเสนอแนะการใช้คลื่นความถี่ที่เหมาะสมกับแอปพลิเคชันหลัก

ของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด ตามแผนแม่บท การพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579 สรุปผลการศึกษาดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อเสนอแนะการใช้คลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชันต่างๆ ของระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด

Application	ความสำคัญของข้อมูล	การใช้คลื่นความถี่ที่เหมาะสม
Application ในโครงข่ายของผู้ใช้ไฟฟ้า HAN/BAN/FAN		
ระบบบริหารจัดการพลังงาน HEMS/ BEMS/FEMS (Home/Building/Factory Energy Management System)	Non-critical	คลื่นความถี่แบบ Unlicensed
Application ในโครงข่ายระดับ NAN/FAN		
ระบบสมาร์ตมิเตอร์ AMR/AMI	Non-critical	- คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/Licensed (ในบางพื้นที่เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้โดยรวม) - โครงข่ายเซลลูลาร์ในกรณีพื้นที่ห่างไกล
Demand Response	Non-critical	- คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/โครงข่ายเซลลูลาร์ - คลื่นความถี่แบบ Licensed (เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้)
Distribution Automation	Critical	คลื่นความถี่แบบ Licensed/เทคโนโลยีแบบมีสาย
ระบบกักเก็บพลังงาน (ระดับผู้ใช้ไฟฟ้า)	Non-critical	- คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/โครงข่ายเซลลูลาร์ - คลื่นความถี่แบบ Licensed (เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้)
ระบบกักเก็บพลังงาน (ระดับกริด)	Critical	คลื่นความถี่แบบ Licensed/เทคโนโลยีแบบมีสาย
ระบบ Microgrid	Critical	คลื่นความถี่แบบ Licensed/เทคโนโลยีแบบมีสาย
ระบบ RE Forecast	Non-critical	คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/โครงข่ายเซลลูลาร์
ระบบการบริหารจัดการยานยนต์ไฟฟ้า และสถานีอัดประจุไฟฟ้า	Non-critical	คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/โครงข่ายเซลลูลาร์
ระบบสื่อสารข้อมูลกับ SPP/VSP (Small/Very Small Power Producer)	Critical	คลื่นความถี่แบบ Licensed/เทคโนโลยีแบบมีสาย
Smart Streetlight	Non-critical	คลื่นความถี่แบบ Unlicensed/โครงข่ายเซลลูลาร์
Application ในโครงข่ายระดับ WAN		
Wide Area Monitoring System Wide Area Protection System Wide Area Control System	Critical	- เทคโนโลยีแบบมีสาย เช่น Optical Fiber - สามารถใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ช่วยเสริมได้
Substation Automation	Critical	การไฟฟ้ามีโครงข่าย Optical Fiber ไปยังสถานีไฟฟ้า

ที่มา : ข้อมูลจากการศึกษาและวิจัยของ วาทีต เบญจพลกุล

11. ข้อเสนอแนะการใช้คลื่นความถี่สำหรับการพัฒนา ระบบโครงข่ายสมรรถกิริตของประเทศไทย

จากผลการศึกษาตามที่น่าเสนอข้างต้น ผู้เขียนได้นำมาจัดทำข้อเสนอแนะในการใช้คลื่นความถี่สำหรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริตของประเทศไทย โดยแบ่งเป็น 3 แนวทาง ดังนี้

11.1 การใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed

การใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed เหมาะสำหรับรองรับแอปพลิเคชันที่มีความสำคัญของข้อมูลแบบ Non-critical ซึ่งการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งสามารถใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed ตามข้อกำหนดของ กสทช. เกี่ยวกับเครื่องวิทยุคมนาคมและสถานีวิทยุคมนาคมที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตดังแสดงในตารางที่ 3 โดยการเข้าใช้คลื่นความถี่ (Spectrum access) ของอุปกรณ์สื่อสารต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในประกาศ กสทช. อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านอุปกรณ์ระบบโครงข่ายสมรรถกิริตในตลาดทั่วโลก การใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed ในประเทศไทยน่าจะอยู่ที่ย่านความถี่ 433 MHz, 920-925 MHz, 2.4 GHz (คลื่นความถี่ 2.4-2.5 GHz) และ 5 GHz (คลื่นความถี่ 5.15-5.35 GHz และ 5.47-5.85 GHz)

แม้ว่าการใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed สำหรับพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริตจะมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ซึ่งโดยทั่วไปถือว่าค่อนข้างประสบความสำเร็จ แต่การไฟฟ้าส่วนใหญ่ยังมีข้อกังวลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้และความพร้อมใช้งานของโครงข่ายสื่อสาร ซึ่งเกิดจากปัญหาด้านการรบกวนของสัญญาณอันเนื่องมาจากความหนาแน่นของการใช้งานคลื่นความถี่แบบ Unlicensed ที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของโครงข่ายสื่อสารประสบปัญหาได้ อีกทั้งยังเห็นว่าการใช้คลื่นความถี่แบบ Unlicensed เพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริตในระยะยาวได้ โดยเฉพาะสำหรับแอปพลิเคชันด้านการตรวจสอบและควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าในระดับพื้นที่กว้าง (Wide area) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

11.2 การใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed

การใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed เหมาะสมสำหรับรองรับแอปพลิเคชันในงานด้านปฏิบัติการและการควบคุมสั่งการภายในระบบไฟฟ้าและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าหลัก หากการสื่อสารข้อมูลเกิดความผิดพลาดอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นการใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed สำหรับพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริตถือเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรักษาความมั่นคงทางพลังงานให้กับประเทศ

ปัจจุบันสำนักงาน กสทช. ยังไม่มีนโยบายจัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed เพื่อใช้ในการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดเป็นการเฉพาะ และนโยบายของสำนักงาน กสทช. ต้องการให้หน่วยงานสาธารณูปโภคใช้คลื่นความถี่ในลักษณะการใช้งานร่วมกัน (Shared use) เพื่อให้เกิดการใช้คลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการขอจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดควรเป็นการขอจัดสรรร่วมกันของการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง และควรหารือร่วมกับหน่วยงานสาธารณูปโภคอื่นๆ ที่มีโอกาสใช้งานแอปพลิเคชันที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น ระบบสมาร์ตมิเตอร์สำหรับมิเตอร์น้ำ โดยเป็นการขอจัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed ในย่านที่ถูกกำหนดไว้สำหรับกิจการประจำที่และกิจการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ สำนักงาน กสทช. ควรมีการเผยแพร่ข้อมูลย่านความถี่แบบ Licensed ที่ยังว่างออกสู่สาธารณะ เพื่อที่หน่วยงานต่างๆ สามารถนำไปศึกษาและพิจารณาความเหมาะสมในการขอจัดสรรคลื่นความถี่ให้ตรงตามความต้องการใช้งานมากที่สุด ทั้งนี้ การศึกษาในครั้งนี้พบว่า ย่านความถี่ที่มีความเหมาะสมทั้งทางเทคนิคและต้นทุนการลงทุน รวมทั้งมีอุปกรณ์ในตารางรองรับ ได้แก่ ย่าน 430-450 MHz

จากการศึกษาตัวอย่างการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในต่างประเทศ ยังไม่พบว่า มีประเทศใดที่กำหนดคลื่นความถี่แบบ Licensed สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดเป็นการเฉพาะ รวมทั้งยังไม่มีกรณีการไฟฟ้าใดที่ดำเนินการขออนุญาตใช้คลื่นความถี่แบบ Licensed ด้วยตนเองเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริด อย่างไรก็ตาม การไฟฟ้าในต่างประเทศเริ่มมีการพิจารณาความเป็นไปได้ในการขอจัดสรรคลื่นความถี่แบบ Licensed เพื่อนำมาใช้รองรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดในอนาคต โดยเฉพาะ เพื่อรองรับแอปพลิเคชันที่มีความสำคัญในการรักษาเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

11.3 การใช้คลื่นความถี่ของผู้ประกอบกิจการโทรคมนาคม

การใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อรองรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ (Machine to Machine: M2M) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เนื่องจากโครงข่ายเซลลูลาร์ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่แล้ว จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและระยะเวลาในการติดตั้งโครงข่ายสื่อสารลงได้อย่างมาก อย่างไรก็ตาม การใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ทำให้การไฟฟ้าไม่สามารถบริหารจัดการหรือวางแผนงานด้านระบบสื่อสารเพื่อรองรับการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากเป็นการพึ่งพาโครงข่ายสื่อสารของบุคคลที่ 3 และหากพิจารณาต้นทุนรวมของการเป็นเจ้าของ การพัฒนาโครงข่ายสื่อสารเป็นของตนเองอาจมีความคุ้มค่ากว่าการใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์ในระยะยาว ดังนั้นหน่วยงานการไฟฟ้าจึงควรวิเคราะห์ความเหมาะสมดังกล่าว โดยมีการหารือข้อตกลงและรูปแบบทางธุรกิจร่วมกับผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการลงทุนสร้างโครงข่ายสื่อสารด้วยตนเอง และควรมีข้อพิจารณาว่าเทคโนโลยีและมาตรฐานด้านโทรคมนาคม

มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยกว่าเทคโนโลยีในธุรกิจระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลให้การไฟฟ้าต้องปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ให้รองรับเทคโนโลยีใหม่ตามการแข่งขันในธุรกิจด้านโทรคมนาคม ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ การใช้บริการโครงข่ายเซลลูลาร์สำหรับระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดมีความเหมาะสมกับแอปพลิเคชันที่มีความสำคัญของข้อมูลแบบ Non-critical โดยจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการสื่อสารในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งไม่คุ้มค่าในการสร้างโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารให้ไปถึงพื้นที่ดังกล่าว

บรรณานุกรม

- 450 Alliance.org. (2014). *The Economics of 450 MHz Band for the Smart Grid and Smart Metering*.
- Berger, L. T., & Iniewski, K. (2012). *Smart Grid - Applications, Communications and Security*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- CDG 450 Connectivity Special Interest Group. (2013). *The 450 MHz Band for the Smart Grid and Smart Metering*.
- Changmin, P. (2012). *Use Cases in Korea - AMI in Smart Grid Jeju Testbed*. Paper presented at Smart Grid Interoperability Panel 2012, Texas.
- European Utilities Telecom Council. (2013). *Spectrum needs for Utilities*.
- Feixiang, M. (2013). *China Southern Power a Smarter Grid via LTE*.
- GTM Research. (2013). *Trends in Utility Smart Grid Communications Management*.
- Huawei. *Huawei eLTE Solution for Smart Grids*.
- Landis+Gyr. (2013). *A major Smart Metering project with Helen Electricity Network*.
- Moll, E. (2013). *CDMA-450: Managed Wireless Services*. Paper presented at EUTC Workshop, Brussels.
- National Institute of Standards and Technology. (2014). *Guidelines for Accessing Wireless Standards for Smart Grid Applications*. NIST Smart Grid Interoperability Panel Priority Action Plan 2.
- Phuong, D. (2016, December 12). EVN NPC chi 120 tỷ mua điện kế điện tử: Mới lắp đặt đã chấp chừa. Retrieved from <http://www.nguoiduatin.vn/evn-npc-chi-120-ty-mua-dien-ke-dien-tu-moi-lap-dat-da-chap-chon-a309980.html>
- Qualcomm. (2012). *3G Cellular Technology for Smart Grid Communications*. [PowerPoint].
- San Diego Gas & Electric. (2010). *Comments of San Diego Gas & Electric Company to United States Department of Energy*.
- Sand, K., Nordgard, D. E., Solvang, T. B., Foosnaes, J., Kristoffersen, V., & Wage, D. (2013). *Experiences from Norwegian Smart Grid Pilot Projects*. Paper presented at 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm.
- Sensus USA Inc. (2011). *Smart Grid Communications Solutions Licensed versus Unlicensed Spectrum*.
- Silverspring Networks. *Why Unlicensed Spectrum Dominates the Smart Grid*.
- Thien Le, N., Benjapolakul, W., Dinh Ngoc, S., Cong Truong, D., & Hung, T. (2017). *Experiences from Vietnam Smart Meter Reading Pilot Project*. Paper presented at PEACON & Innovation 2017, Bangkok, Thailand.
- Tushar, W., Yuen, C., Chai, B., Huang, S., Wood, K.L., Kerk, S.G., & Yang, Z. (2016). Smart Grid Testbed for Demand Focused Energy Management in End User Environments. *IEEE Wireless Communication Magazine*, 23(6), 70-80.