

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ

Railway Electrification

SUT 1st EDITION



ธนัดชัย กุลรวรานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ

Railway Electrification

SUT 1st Edition

ธนัดชัย กุลวรรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สงวนลิขสิทธิ์ © 2561

พิมพ์ครั้งที่ 3

มีนาคม 2561

ISBN : 978-616-440-005-4

พิมพ์ที่ : ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง

จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-3061-3, โทรสาร 0-4422-3060

คำนำจากผู้ประพันธ์

โครงการรถไฟฟ้าทางไกล รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและรถไฟฟ้าความเร็วสูงเป็นประเด็นที่ได้รับการสนับสนุนและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แผนพัฒนาระบบรถไฟฟ้าในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่วางไว้ประมาณ 10 เส้นทาง ได้ถูกนำมาขับเคลื่อนและเริ่มต้นก่อสร้าง จนถึงปัจจุบันได้มีการเปิดให้บริการไปแล้ว เช่น รถไฟฟ้าสายสีเขียว สายสีน้ำเงิน และสายสีม่วง เป็นต้น สายที่กำลังก่อสร้างซึ่งยังไม่แล้วเสร็จ เช่น สายสีแดง สายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย และสายสีเขียวส่วนต่อขยาย อีกทั้งมีโครงการบางเส้นทางที่เปิดประมูลไปแล้ว เช่น สายสีชมพูหรือสายสีทอง เป็นต้น รัฐบาลได้พยายามผลักดันการพัฒนาระบบขนส่งสู่ระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC: Eastern Economic Corridor) เน้นไปที่ 3 จังหวัดในภาคตะวันออก ประกอบด้วย ฉะเชิงเทรา ชลบุรีและระยอง ไปสิ้นสุดที่สนามบินอู่ตะเภา โดยวางแผนให้มีรถไฟฟ้าความเร็วสูงเชื่อมระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออกกับกรุงเทพมหานคร รวมทั้งการเริ่มพัฒนาระบบรถไฟฟ้าทางคู่ไปยังภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศ ทำให้ในอนาคตมีความเป็นไปได้ที่จะมีการพัฒนาทางรถไฟสายหลักในรูปแบบของรางไฟฟ้า

จากโครงการที่กล่าวมา ระบบรถไฟฟ้าที่นำมาใช้รวมถึงขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการเป็นการนำเอาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยองค์ความรู้ทางด้านการขับเคลื่อนรถไฟและระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟนี้จำกัดอยู่ในงานวิชาชีพรถไฟและการรถไฟเท่านั้น เมื่อมีการขยายโครงการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องต้องได้รับการเผยแพร่สู่วงวิชาการไปยังคณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย วิศวกรและผู้ปฏิบัติงานสามารถเรียนรู้เพิ่มเติมได้ จุดประสงค์ของการประพันธ์ตำราฉบับนี้เพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟมีความแพร่หลายในวงวิชาการมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะในประเทศไทยที่ภาคการศึกษาไม่ได้พัฒนางานวิจัยและการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าเท่าที่ควร

เนื่องจากตำราด้านรถไฟที่เผยแพร่สู่สาธารณะมีน้อย และยังจำกัดอยู่ในสถาบันวิชาชีพหรือองค์กรของรัฐ ปัญหาที่พบในขณะพัฒนาตำราฉบับนี้ คือ การแปลความหมายหรือการใช้คำศัพท์ภาษาไทย ศัพท์เทคนิคหลายคำไม่ได้รับการบรรจุ

ไว้ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หรือศัพท์เฉพาะทางวิศวกรรมของสมาคม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ทำให้การใช้คำศัพท์ต้องมีการ บัญญัติและเลือกใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งการเลือกใช้คำศัพท์หลายคำที่ปรากฏใน เอกสารเป็นการเลือกด้วยความชื่นชอบในการใช้คำเหล่านั้นของผู้ประพันธ์ด้วยส่วน หนึ่ง ผู้ประพันธ์ได้ตระหนักถึงความไม่แพร่หลายของศัพท์ทางเทคนิคดังกล่าว ดังนั้น หากมีการบัญญัติศัพท์ต่าง ๆ เหล่านี้อย่างเป็นทางการโดยราชบัณฑิตหรือสมาคม วิศวกรรมสถานฯ ผู้ประพันธ์จะยึดถือเป็นภาระในการปรับปรุงแก้ไขตำราฉบับนี้ให้ สอดคล้องตามการบัญญัติใหม่ต่อไปในอนาคต

เอกสารเล่มนี้แบ่งออกเป็น 7 บท บทที่ 1 และบทที่ 2 เป็นบทที่นำเสนอ ความรู้ทั่วไป ความรู้พื้นฐานและองค์ประกอบของส่วนต่าง ๆ ของการขนส่งระบบราง เนื้อหาสาระในรายวิชาการระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟเริ่มต้นอย่างเป็นทางการในบทที่ 3 บทนี้ได้กล่าวถึงการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าในงานรถไฟ เนื้อหาเน้นไปที่การเลือกขนาด มอเตอร์ขับเคลื่อน วงจรขับเคลื่อน การเริ่มเดินเครื่องและการหยุดเดินเครื่องรวมถึง การควบคุมมอเตอร์รูปแบบต่าง ๆ ที่ใช้งานในระบบรถไฟไฟฟ้า บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึง ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ ในส่วนนี้เน้นไปที่ระบบสายจ่ายตัวนำที่จ่ายไฟฟ้าให้กับ ขบวนรถไฟเป็นสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงหรือระบบ จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ ในบทนี้ผู้ประพันธ์ได้นำเสนอตัวอย่างประกอบการ ศึกษา ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากการในระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟเป็นงานที่ใหม่สำหรับ ประเทศไทย ผู้ประพันธ์จึงได้เพิ่มกรณีศึกษา เพื่อให้ผู้อ่านได้เรียนรู้ถึงระบบการจ่าย ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ายกระดับที่คิดสร้งมาจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ทั้งอังกฤษ ฝรั่งเศส เยอรมัน สเปน ญี่ปุ่นหรือจีน เป็นต้น บทที่ 5 เป็นบทที่ผู้ประพันธ์ใช้ประสบการณ์ที่ได้ ทำงานวิจัยด้านระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ โดยรายละเอียดส่วนใหญ่ในบทนี้จะเป็นการ คำนวณหาผลเฉลยแรงดันของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนรูปแบบต่าง ๆ หรือเรียกว่า การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน เช่นเดียวกันกับบทที่ 4 ในบทที่ 5 ได้มีการเพิ่มกรณีศึกษาที่มาจากตำราอ้างอิง เอกสารงานวิจัยต่าง ๆ รวมทั้งงานวิจัยของผู้ประพันธ์ด้วย บทที่ 6 เป็นการคำนวณสมรรถนะของขบวนรถไฟ ที่เคลื่อนที่ไปตามทางวิ่ง แรงต้านการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ การศึกษาแบบจำลอง

ระบบรถไฟหลายขบวน รวมถึงการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของระบบรถไฟในด้านต่าง ๆ บทที่ 7 เป็นบทสุดท้ายของตำรา เป็นบทที่กล่าวถึงเรื่องการป้องกันระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ เพื่อให้การให้บริการระบบรถไฟแก่ผู้โดยสารสาธารณะมีความปลอดภัย ในบทนี้กล่าวถึงการลัดวงจรรูปแบบต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้า การป้องกันและรีเลย์ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ป้องกันการต่อลงดินและการเชื่อมประสานเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานการต่อลงดินที่กำหนด นอกจากนี้ ผู้ประพันธ์ได้เพิ่มภาคผนวกที่เป็นการสรุปความรู้พื้นฐานให้กับผู้อ่านด้วย

ยิ่งไปกว่านั้น ผู้ประพันธ์ขอขอบคุณผู้ที่ได้ให้การช่วยเหลืองานเขียนตำราเล่มนี้สำเร็จจุล่งไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษาบัณฑิตศึกษาในความดูแลของผู้ประพันธ์ ได้แก่ ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, ณัฐพงศ์ มิ่งพฤกษ์, กฤษดา มงคลดี, วัยอาจ สายคง, ก่อเกียรติ อืดทรัพย์, เจษฎา เวียงจันทิก, ธวัช ชูจิต และอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ทำงานวิจัยอย่างดีเยี่ยมจนได้ผลการวิจัยที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในตำราเล่มนี้ ตลอดจนนักศึกษาในชั้นเรียน EEE531 Railway Electrification มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ 529429 Railway Electrification มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ผู้ประพันธ์ได้เริ่มต้นการสอนและเรียบเรียงตำราเล่มนี้ตั้งแต่ปี 2558 จนถึงปัจจุบัน โดยได้ทดลองใช้เอกสารบางส่วนและช่วยตรวจแก้ไขและให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงตำราเล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณการตรวจทานต้นฉบับจาก อาจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล กงศ์หิรัญ สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ท้ายที่สุดผู้ประพันธ์ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ให้ความสำคัญต่อการจัดการเรียนการสอนและการทำงานวิจัยในด้านระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟทำให้งานเขียนนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี



ธนัดชัย กุลวรรณิชพงษ์

1 มีนาคม 2561

สารบัญ

คำนำจากผู้ประพันธ์	ก
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญตาราง	ผ
คำย่อภาษาอังกฤษ	ฟ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วิวัฒนาการของระบบขนส่งทางราง	2
1.3 อุตสาหกรรมรถไฟ	6
1.4 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	10
1.5 รถไฟฟ้าสายหลัก	18
1.6 รถไฟความเร็วสูง	25
1.7 ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย	26
1.8 สรุป	29
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	30

บทที่ 2 เทคโนโลยีรถไฟและระบบรางเบื้องต้น

2.1 กล่าวนำ	33
2.2 ระบบทางรถไฟ	33
2.3 ล้อเลื่อน	44
2.4 เทคโนโลยีการขับเคลื่อนและตัวต้นกำลัง	49

2.5 ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	55
2.6 การอาณัติสัญญาณรถไฟ	66
2.7 สรุป	82
2.8 คำถามท้ายบท	82
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	83

บทที่ 3 การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสำหรับรถไฟ

3.1 กล่าวนำ	85
3.2 หลักการพื้นฐานของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า	85
3.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	107
3.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	137
3.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส	159
3.6 เทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	164
3.7 สรุป	182
3.8 แบบฝึกหัดท้ายบท	183
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	184

บทที่ 4 หลักการของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

4.1 กล่าวนำ	187
4.2 หลักการพื้นฐานของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟ	187
4.3 การต่อขดลวดของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กระแสสลับ	202
4.4 ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับสำหรับรถไฟ	218
4.5 ระบบสายตัวนำสัมผัสพาดอากาศ	230
4.6 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถไฟ	255
4.7 สรุป	271
4.8 แบบฝึกหัดท้ายบท	271

บทที่ 5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

5.1 กล่าวนำ	277
5.2 การวิเคราะห์เชิงเส้นของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	278
5.3 การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟกระแสสลับ	295
5.4 การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟกระแสตรง	359
5.5 สรุป	374
5.8 แบบฝึกหัดท้ายบท	374
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	378

บทที่ 6 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟ

6.1 กล่าวนำ	380
6.2 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถไฟ	380
6.3 แรงฉุดของหัวรถจักร	390
6.4 การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟหนึ่งขบวน	397
6.5 การจับภาพโครงข่ายรถไฟ	404
6.6 การจำลองผลระบบรถไฟหลายขบวน	417
6.7 สรุป	441
6.8 แบบฝึกหัดท้ายบท	442
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	444

บทที่ 7 การป้องกันและความปลอดภัยในระบบรางไฟฟ้า

7.1 กล่าวนำ	447
7.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง	447
7.3 รีเลย์และการป้องกันสำหรับระบบรางไฟฟ้า	472

7.4 การการป้องกันสำหรับระบบรถไฟทางไกล	511
7.5 การต่อลงดินและการเชื่อมประสานในระบบรถไฟ	526
7.6 สรุป	552
7.7 แบบฝึกหัดท้ายบท	553
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	556

ภาคผนวก ก. มอเตอร์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	559
ภาคผนวก ข. ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	585
ภาคผนวก ค. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	605
ภาคผนวก ง. สัญลักษณ์และหมายเลขรหัสของรีเลย์ป้องกัน	621
ภาคผนวก จ. อภิธานศัพท์	629
ประวัติผู้ประพันธ์	637
บรรณานุกรม	641

สารบัญรูป

บทที่ 1

รูปที่ 1.1	งานแสดงรถจักรไอน้ำวิ่งบนรางเหล็กครั้งแรกในปี ค.ศ. 1804	2
รูปที่ 1.2	รถจักรไฟฟ้าทดสอบในงาน Berlin Fair ปี ค.ศ. 1879	3
รูปที่ 1.3	สถานีเรียงกระแสน้ำไอพ่นที่สถานีจ่ายไฟ Arnos Grove สาย Piccadilly รถไฟใต้ดินกรุงลอนดอน ปี ค.ศ. 1933	4
รูปที่ 1.4	Simplon Tunnel และรถจักรไฟฟ้า 3 เฟส	6
รูปที่ 1.5	วิศวกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีการขนส่ง	7
รูปที่ 1.6	มูลค่าของส่วนแบ่งการตลาดในงานอุตสาหกรรมรถไฟในปี 2003 – 2005	8
รูปที่ 1.7	ส่วนแบ่งการตลาดในอุตสาหกรรมรถไฟเปรียบเทียบในปี 2001 และ 2009	9
รูปที่ 1.8	แผนที่ให้บริการรถไฟใต้ดินกรุงลอนดอน	11
รูปที่ 1.9	รถไฟใต้ดินเปิดให้บริการสายแรกของโลกในปี ค.ศ. 1863	11
รูปที่ 1.10	รถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนปี ค.ศ. 2014	12
รูปที่ 1.11	การก่อสร้างรถไฟขนส่งมวลชนกรุงปารีสในช่วงปี ค.ศ. 1902 – 1910	13
รูปที่ 1.12	แผนที่รถไฟฟ้ามวลชนกรุงปารีส	14
รูปที่ 1.13	รถไฟฟ้ามวลชนกรุงปารีส	15
รูปที่ 1.14	แผนที่รถไฟฟ้ามวลชนกรุงโตเกียว	16
รูปที่ 1.15	รถไฟ JR East Yamanote Line	17
รูปที่ 1.16	แผนที่ทางรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักร	19
รูปที่ 1.17	รถไฟ Eurostar	20
รูปที่ 1.18	แผนภาพทางรถไฟสายหลักที่ให้บริการรถไฟ ICE ของประเทศเยอรมัน	21
รูปที่ 1.19	รถไฟ ICE ของประเทศเยอรมัน	22

รูปที่ 1.20	แผนภาพระบบทางรถไฟสายหลักของกลุ่ม JR	23
รูปที่ 1.21	รถไฟความเร็วสูง Shinkansen (Hokuriku Shinkansen)	24
รูปที่ 1.22	ระบบโครงข่ายทางรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย	27
รูปที่ 1.23	รถไฟสายหลักให้บริการโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย	28
รูปที่ 1.24	รถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล	28
รูปที่ 1.25	แผนระบบรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล และจังหวัดข้างเคียง	29

บทที่ 2

รูปที่ 2.1	โครงสร้างระบบทางรถไฟ	34
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางและแบบไม่ใช้หินโรยทาง	35
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางและแบบไม่ใช้หินโรยทาง	35
รูปที่ 2.4	ขนาดความกว้างของรางที่ใช้แพร่หลาย	36
รูปที่ 2.5	ขนาดความกว้างของราง	37
รูปที่ 2.6	การใช้งานรางรถไฟในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก	37
รูปที่ 2.7	รูปแบบรางชนิดมีร่อง	39
รูปที่ 2.8	รูปแบบรางชนิดด้านล่างเรียบ	39
รูปที่ 2.9	รูปแบบรางที่ใช้สำหรับเกจมาตรฐาน	40
รูปที่ 2.10	รูปแบบรางที่ใช้สำหรับเกจหนึ่งเมตร	40
รูปที่ 2.11	หมอนรองรางชนิดต่าง ๆ	41
รูปที่ 2.12	อุปกรณ์ยึดจับรางแบบที่ใช้ตะปูหรือสลักเกลียว	42
รูปที่ 2.13	อุปกรณ์ยึดจับรางแบบยืดหยุ่นได้ (elastic fastening)	42
รูปที่ 2.14	การเชื่อมแบบแฟลชบัดต์และการเชื่อมด้วยความร้อน	43
รูปที่ 2.15	แผนภาพโครงสร้างล้อรถไฟและพื้นที่สัมผัสกับรางวิ่ง	44
รูปที่ 2.16	โครงสร้างของโบกี้และล้อเลื่อน	46
รูปที่ 2.17	โบกี้รถไฟแบบต่อพ่วงและแบบไม่ต่อพ่วง	47
รูปที่ 2.19	โครงสร้างการจัดเรียงล้อ	48
รูปที่ 2.20	โครงสร้างรถจักรดีเซลไฮดรอลิกและดีเซลไฟฟ้า	49

รูปที่ 2.21 รถจักรดีเซลไฟฟ้า RAG 661 DE 1003 (Bombardier Transportation)	50
รูปที่ 2.22 รถจักรไฟฟ้าที่ใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	51
รูปที่ 2.23 รถจักรไฟฟ้าที่ใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	52
รูปที่ 2.24 ส่วนประกอบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับรถจักรไฟฟ้า	53
รูปที่ 2.25 รถไฟฟ้ารางและระบบขับเคลื่อน	53
รูปที่ 2.26 การควบคุมด้วยตัวต้านทานสถิตและการควบคุมด้วยวงจรสับไฟฟ้า	55
รูปที่ 2.27 การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟให้ขบวนรถไฟฟ้า	56
รูปที่ 2.28 การต่อหม้อแปลงกับระบบไฟฟ้า 115 kV	58
รูปที่ 2.29 แผนภาพการจ่ายไฟระบบรถไฟฟ้าสายหลักแบบทางคู่	59
รูปที่ 2.30 แผนภาพการจ่ายไฟในระบบรางสายหลักและตัวนำที่เกี่ยวข้อง	60
รูปที่ 2.31 แผนโทกราฟ	60
รูปที่ 2.32 สถานีจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบรางรถไฟฟ้าสายหลัก	61
รูปที่ 2.33 ระบบยึดสายป้อนสัมผัสหรือระบบแคทีนารี	61
รูปที่ 2.34 รูปแบบการจ่ายไฟมาตรฐานของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ	63
รูปที่ 2.35 โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สาม	63
รูปที่ 2.36 วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC 60146	64
รูปที่ 2.37 วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC 60146	64
รูปที่ 2.38 แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850	64
รูปที่ 2.39 การจ่ายไฟโดยไม่มีการติดตั้งส่วนทางวิ่ง	65
รูปที่ 2.40 การจ่ายไฟโดยมีการติดตั้งส่วนทางวิ่ง	65
รูปที่ 2.41 การให้สัญญาณมือโดยตำรวจรถไฟ	67
รูปที่ 2.42 การให้สัญญาณแบบทางปลา	68
รูปที่ 2.43 การให้สัญญาณแบบตอนสมบูรณ์	68
รูปที่ 2.44 การอาณัติสัญญาณระหว่างนายสถานี	69
รูปที่ 2.45 การบังคับสัมพันธ์	69

รูปที่ 2.46 สัญญาณไฟชนิด 3-Aspect	70
รูปที่ 2.47 การแบ่งวงจรตอนสัญญาณ	71
รูปที่ 2.48 วงจรไฟตอนอย่างง่าย	72
รูปที่ 2.49 เครื่องนับเพลลา	73
รูปที่ 2.50 AWS และ TPWS	74
รูปที่ 2.51 การส่งสัญญาณโดยใช้ปีคอน	75
รูปที่ 2.52 ระบบอาณัติสัญญาณแบบเคลื่อนที่	76
รูปที่ 2.53 ระบบ ERTMS	77
รูปที่ 2.54 ระดับของ ERTMS	78
รูปที่ 2.55 โครงสร้างของวงจรไฟตอนรูปแบบต่าง ๆ	79
รูปที่ 2.56 โครงสร้างของเครื่องนับเพลลา	80
รูปที่ 2.57 หลักการทำงานของเครื่องนับเพลลา	81
รูปที่ 2.58 หลักการทำงานของอิมพีแดนซ์เชื่อมประสาน	81
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 โครงสร้างการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า	86
รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไดโอด	88
รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ใช้ไทรสเตอร์	89
รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์หยุดนำกระแสด้วยตัวเอง	90
รูปที่ 3.6 วงจรสับไฟฟ้า	91
รูปที่ 3.7 วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์	92
รูปที่ 3.8 วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์	92
รูปที่ 3.9 ยานการทางานของมอเตอร์ไฟฟ้า	94
รูปที่ 3.10 การควบคุมขีดจำกัดกระแสไฟฟ้า	95
รูปที่ 3.11 การควบคุมแรงบิดแบบวงรอบปิด	95
รูปที่ 3.12 การควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด	96
รูปที่ 3.13 การควบคุมความเร็วรอบด้วยเฟสล็อกกลูป	97

รูปที่ 3.14	การควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ	97
รูปที่ 3.15	ลักษณะสมบัติการให้ความร้อนและการเย็นตัวของมอเตอร์	100
รูปที่ 3.16	การขับโหลดรูปแบบต่าง ๆ ของมอเตอร์	102
รูปที่ 3.17	กระแสโหลดของมอเตอร์	103
รูปที่ 3.18	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมนำมาใช้งาน	107
รูปที่ 3.19	วงจรสมมูลของขดลวดอาร์เมเจอร์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	108
รูปที่ 3.20	ลักษณะสมบัติแรงบิดและความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	110
รูปที่ 3.21	ตัวอย่างวงจรเริ่มเดินเครื่องสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	113
รูปที่ 3.22	การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบพลวัต	115
รูปที่ 3.23	แรงบิดและความเร็วรอบของการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบพลวัต	116
รูปที่ 3.25	แรงบิดและความเร็วรอบของการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยไฟฟ้า	119
รูปที่ 3.26	การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์และการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก	121
รูปที่ 3.27	ขีดจำกัดของแรงบิดและกำลังงานสำหรับการควบคุมมอเตอร์	121
รูปที่ 3.28	วงจรขั้วมอเตอร์ที่ใช้หม้อแปลงเปลี่ยนแท็ปได้และวงจรเรียงกระแส	122
รูปที่ 3.29	การเปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลง	123
รูปที่ 3.30	การขับเคลื่อนด้วยวงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุม	123
รูปที่ 3.31	การนำกระแสของวงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุมแบบเต็ม	124
รูปที่ 3.32	ย่านการทำงานของการนำกระแสแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง	125
รูปที่ 3.33	การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุมแบบเต็ม	126
รูปที่ 3.34	การนำกระแสของวงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุมแบบครึ่ง	128
รูปที่ 3.35	ย่านการทำงานของการนำกระแสแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง	129
รูปที่ 3.36	การทำงานของวงจรเรียงกระแสที่ถูกควบคุมแบบครึ่ง	130
รูปที่ 3.37	ลักษณะสมบัติการขับมอเตอร์อนุกรมด้วยวงจรเรียงกระแส ที่ถูกควบคุม	131

รูปที่ 3.38	วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้วงจรสับไฟฟ้า Q1	132
รูปที่ 3.39	วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้วงจรสับไฟฟ้า Q2	133
รูปที่ 3.40	วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้วงจรสับไฟฟ้า 2Q	134
รูปที่ 3.41	วงจรควบคุมการเบรกมอเตอร์กระแสตรงแบบพลวัต	134
รูปที่ 3.42	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	138
รูปที่ 3.43	การเริ่มเดินเครื่องแบบสตาร์ทเดลตาและแบบที่ใช้หม้อแปลงออโต	141
รูปที่ 3.44	การเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวล	141
รูปที่ 3.45	ลักษณะสมบัติการเบรกด้วยไฟฟ้า	144
รูปที่ 3.46	การเบรกแบบพลวัตด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	146
รูปที่ 3.47	วงจรสเตเตอร์ของการเบรกแบบพลวัต ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	147
รูปที่ 3.48	การเบรกลำดับศูนย์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	147
รูปที่ 3.49	การควบคุมด้วยแรงดันสเตเตอร์	148
รูปที่ 3.50	ลักษณะสมบัติของการควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้	149
รูปที่ 3.51	การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้	150
รูปที่ 3.52	ช่วงการทำงานของ การควบคุมแหล่งจ่ายแบบปรับความถี่ได้	151
รูปที่ 3.53	อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	152
รูปที่ 3.54	โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ	153
รูปที่ 3.55	การเบรกสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันรูปแบบต่าง ๆ	154
รูปที่ 3.56	อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสสำหรับขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	157
รูปที่ 3.57	วงจรสมมูลและลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ ของมอเตอร์ซิงโครนัส	160

รูปที่ 3.58 การขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนส์ด้วยอินเวอร์เตอร์ หยุดนำกระแสด้วยโหลด	163
รูปที่ 3.59 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวต้านทานอนุกรม สำหรับรถไฟ	167
รูปที่ 3.60 โครงสร้างตัวอย่างของวงจรสับไฟฟ้ากระแสตรงควบคุม มอเตอร์ขับเคลื่อน	168
รูปที่ 3.61 Class E 632 FS Italia	169
รูปที่ 3.62 หัวรถจักร BLS Ae 4/4 II ของการรถไฟสวิสเซอร์แลนด์	169
รูปที่ 3.63 หัวรถจักร SJ Rc2 ของการรถไฟประเทศสวีเดน	170
รูปที่ 3.64 หัวรถจักร DB class 103 ของการรถไฟประเทศเยอรมัน	171
รูปที่ 3.65 หัวรถจักรไฟฟ้า TGV และ Thalys ขับเคลื่อน ด้วยมอเตอร์ซึ่งโครนส์	172
รูปที่ 3.66 การทำงานของหัวรถจักรไฟฟ้าที่ใช้ 4QC	174
รูปที่ 3.67 หัวรถจักรไฟฟ้า SBB Re 484 ของ การรถไฟประเทศสวิสเซอร์แลนด์	175
รูปที่ 3.68 หัวรถจักรไฟฟ้า SBB class 460 ของการรถไฟประเทศสวิสเซอร์แลนด์	175
รูปที่ 3.69 BVG 480 Berliner S-Bahn ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส	176
รูปที่ 3.70 ตัวอย่างรถไฟความเร็วสูงแบบ locomotive –hauled และ แบบ EMU	177
รูปที่ 3.71 ICE T class 411 DB ของการรถไฟประเทศเยอรมัน	179
รูปที่ 3.72 Gornergrat railway (Zermatt) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์	181
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับทางรถไฟสายหลักในทวีปยุโรป	189
รูปที่ 4.2 การจ่ายแบบด้านเดียว	190
รูปที่ 4.3 การจ่ายแบบสองด้าน	191
รูปที่ 4.4 โครงสร้างการติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนและป้องกันกระแสเกิน	191

รูปที่ 4.5	โครงสร้างวงจรการจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	194
รูปที่ 4.6	พิกัดสถานีจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	197
รูปที่ 4.7	วงจรของสถานีเรียงกระแสสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	198
รูปที่ 4.8	การต่อขดลวดของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าแบบเก่า	203
รูปที่ 4.9	การต่อขดลวดแบบเฟสเดียวและวงจรสมมูล ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน	204
รูปที่ 4.10	การต่อขดลวดแบบวีและแบบสกอตต์	208
รูปที่ 4.11	การต่อขดลวดแบบเลอบลองก์	212
รูปที่ 4.12	การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบวูดบริดจ์ดัดแปลง	217
รูปที่ 4.13	การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบรูฟเดลตา	217
รูปที่ 4.14	การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบไขว้	218
รูปที่ 4.15	สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบสายตัวนำแบบสัมผัส สำหรับรถไฟฟ้า	219
รูปที่ 4.16	สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	219
รูปที่ 4.17	สถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟ	220
รูปที่ 4.18	การกระจายของกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง	221
รูปที่ 4.19	ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงบูสเตอร์	222
รูปที่ 4.20	ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงบูสเตอร์	222
รูปที่ 4.21	การกระจายของกระแสไฟฟ้าในระบบหม้อแปลงบูสเตอร์	223
รูปที่ 4.22	ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงออโต	223
รูปที่ 4.23	การกระจายของกระแสไฟฟ้าในระบบหม้อแปลงออโต	224
รูปที่ 4.24	ระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลแกนร่วม	225
รูปที่ 4.25	การกระจายของกระแสไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้า ให้รถไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ	226
รูปที่ 4.26	การเปรียบเทียบแรงดันตกของระบบจ่ายไฟฟ้าด้วย AT และ BT	229
รูปที่ 4.27	รูปแบบมาตรฐานของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้รถไฟ	230
รูปที่ 4.28	โครงสร้างระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสพาดอากาศ	231

รูปที่ 4.29	มาตรฐานร่องบากแบบ A และ B	232
รูปที่ 4.30	มาตรฐานส่วนสัมผัสแบบ A และ B	232
รูปที่ 4.31	การเชื่อมต่อระหว่างสายตัวนำสัมผัสและสายเมสเซนเจอร์	233
รูปที่ 4.32	การแขวนตัวนำแบบโทรลลี	236
รูปที่ 4.33	การแขวนแบบจุดเดียวและแบบใช้สายรั้ง	236
รูปที่ 4.34	การแขวนแบบสามเหลี่ยม	237
รูปที่ 4.35	การแขวนแบบแคทีแนรี	237
รูปที่ 4.36	การแขวนแบบแคทีแนรี 3 รูปแบบย่อย	238
รูปที่ 4.37	การแขวนแบบแคทีแนรีอย่างง่าย	239
รูปที่ 4.38	การแขวนแบบแคทีแนรีที่ใช้สายเย็บ	240
รูปที่ 4.39	การแขวนแบบแคทีแนรีผสม	241
รูปที่ 4.40	รูปแบบของตอนนิวทรัลหรือส่วนการแยกเฟส	244
รูปที่ 4.41	รูปแบบของตอนซ้อนทับหรือตอนขนาน	246
รูปที่ 4.42	การซ้อนทับแบบต่อเชื่อมและการซ้อนทับด้วยฉนวนไฟฟ้า	247
รูปที่ 4.43	ตอนการซ้อนทับที่จัดวางเสาแบบ 5 ระยะ	248
รูปที่ 4.44	สายดรอปรูปแบบต่าง ๆ	249
รูปที่ 4.45	คานยันสำหรับแขวนตัวนำสำหรับทางวิ่งไม่เกิน 2 ทาง	249
รูปที่ 4.46	การแขวนตัวนำสัมผัสสำหรับระบบหลายทางวิ่ง	250
รูปที่ 4.47	โครงสร้างของการจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำที่สาม	256
รูปที่ 4.48	รางวิ่งและรางตัวนำที่สาม	257
รูปที่ 4.49	พื้นที่หน้าตัดของรางตัวนำที่ 3 และพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	257
รูปที่ 4.50	การจ่ายไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้รถไฟ	258
รูปที่ 4.51	ภาพรวมระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถไฟ	259
รูปที่ 4.52	ระบบจ่ายไฟฟ้า MV ให้รถไฟสายสัมพันธ์	260
รูปที่ 4.53	วงจรจ่ายไฟฟ้าที่สถานีเรียงกระแส	261
รูปที่ 4.54	ตัวอย่างแผนผังสวิตช์เกียร์กระแสตรงที่สถานีไฟฟ้าให้รถไฟ	262
รูปที่ 4.55	ตัวอย่างสวิตช์เกียร์กระแสตรงที่ใช้งานในระบบรถไฟ	262

รูปที่ 4.56	เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสตรงที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้า	264
รูปที่ 4.57	ลักษณะสมบัติด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ตามมาตรฐาน EN 50328	265
รูปที่ 4.58	การใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายกระแส จากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน	266
รูปที่ 4.59	กราฟลักษณะกระแสของขั้นตอนการจ่ายโหลด สำหรับงานรถไฟฟ้า	268
รูปที่ 4.60	ระบบสายตัวนำสัมผัสแบบพาดอากาศ สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ	268
บทที่ 5		
รูปที่ 5.1	แบบจำลองเชิงเส้นของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ กรณีจ่ายแบบด้านเดียว	278
รูปที่ 5.2	แบบจำลองเชิงเส้นของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าให้รถไฟ	279
รูปที่ 5.3	แบบจำลองเชิงเส้นที่พิจารณาผลของศักย์ไฟฟ้าที่รางวิ่ง	281
รูปที่ 5.4	แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบรถไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้า ด้วยแหล่งจ่ายสองด้าน	284
รูปที่ 5.5	แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบรถไฟฟ้าหลายขบวนอย่างง่าย	287
รูปที่ 5.6	แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับระบบรถไฟฟ้าหลายขบวน ที่คิดแรงดันราง	288
รูปที่ 5.7	แบบจำลองเทคนิคการถ่ายโอนโหลด	293
รูปที่ 5.8	แบบจำลองหนึ่งเฟสสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ	296
รูปที่ 5.9	แบบจำลองของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ	296
รูปที่ 5.10	แบบจำลองของสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต่อหม้อแปลงแบบหนึ่งเฟส	297
รูปที่ 5.11	แบบจำลองของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสพาดอากาศ	300
รูปที่ 5.12	แบบจำลองของรถไฟฟ้ากระแสสลับ	307
รูปที่ 5.14	แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ให้รถไฟตัวอย่าง	309

รูปที่ 5.15	แบบจำลองบัส k ในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้รถไฟ	316
รูปที่ 5.16	แบบจำลองรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับ	320
รูปที่ 5.17	แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 2 เฟส	327
รูปที่ 5.18	แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 2 เฟส	328
รูปที่ 5.19	แบบจำลองเซลล์จำกัดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ	329
รูปที่ 5.20	แบบจำลอง 2 เฟส ของระบบสายจ่ายตัวนำสัมผัสพาดอากาศ	332
รูปที่ 5.21	แบบจำลองเซลล์จำกัดของระบบสายตัวนำแคทีแนรีพาดอากาศ	333
รูปที่ 5.22	แบบจำลอง 2 เฟส ของหม้อแปลงออโต	337
รูปที่ 5.23	แบบจำลอง 2 เฟส ของขบวนรถไฟ	339
รูปที่ 5.24	แผนภาพการคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีลำดับเชิงเส้น	344
รูปที่ 5.25	ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง	360
รูปที่ 5.26	แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง	361
รูปที่ 5.27	ลักษณะสมบัติด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ตามมาตรฐาน EN 50328	362
บทที่ 6		
รูปที่ 6.1	ลักษณะสมบัติของแรงดูดของหัวรถจักรกับเส้นโค้งแรงบิด และความเร็วรอบมอเตอร์ขับเคลื่อน	381
รูปที่ 6.2	โครงสร้างระบบขับเคลื่อนของหัวรถจักรไฟฟ้า ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	382
รูปที่ 6.3	แรงดูดมาตรฐาน UIC และลักษณะสมบัติแรงดูด ของหัวรถจักร DB class	382
รูปที่ 6.4	แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของหัวรถจักรไฟฟ้า และการส่งผ่านแรง	383
รูปที่ 6.5	ลักษณะสมบัติของสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ ตามสมการเดวิส	387
รูปที่ 6.6	ลักษณะสมบัติความเร็ว-เวลาของรถไฟ	388
รูปที่ 6.7	ลักษณะสมบัติของแรงดูดต่อขีดจำกัดต่าง ๆ ที่พิจารณา	391

รูปที่ 6.8	ลักษณะสมบัติของแรงยึดเกาะของหัวรถจักรตัวอย่าง	392
รูปที่ 6.9	ลักษณะสมบัติของแรงฉุดของหัวรถจักรตัวอย่าง	392
รูปที่ 6.10	ผลของแรงยึดเกาะต่อแรงฉุดของหัวรถจักร	394
รูปที่ 6.11	แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟแบบฮิสเตอร์ซิส	397
รูปที่ 6.12	แผนภาพการควบคุมความเร็วของขบวนรถไฟแบบสัดส่วน	398
รูปที่ 6.13	แรงฉุดของหัวรถจักรที่แปรผันตามแรงดัน	399
รูปที่ 6.14	ข้อมูลสมรรถนะและการคำนวณการเคลื่อนของขบวนรถไฟ	404
รูปที่ 6.15	ข้อมูลบัสและสายส่งของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิจารณา	405
รูปที่ 6.16	แผนภาพระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิจารณา	405
รูปที่ 6.17	วงจรสมมูลของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่พิจารณา	406
รูปที่ 6.18	ตัวอย่างเส้นทางให้บริการรถไฟ	416
รูปที่ 6.19	ตัวอย่างคลาสขบวนรถไฟ	417
รูปที่ 6.20	โครงสร้างชั้นข้อมูลของการจำลองผลระบบรถไฟหลายขบวน	420
รูปที่ 6.21	แบบจำลองโหลดของระบบรถไฟกระแสตรง	420
บทที่ 7		
รูปที่ 7.1	ลักษณะสมบัติทางความร้อนของตัวนำและรูปแบบ ของวงจรป้องกัน	435
รูปที่ 7.2	รูปแบบการลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส	437
รูปที่ 7.3	องค์ประกอบของกระแสลัดวงจร	438
รูปที่ 7.4	กระแสลัดวงจรสำหรับกรณีสมมาตรและไม่สมมาตร	440
รูปที่ 7.5	โครงสร้างระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ	444
รูปที่ 7.6	แบบจำลองการลัดวงจรของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ แบบจ่ายโดยตรง	445
รูปที่ 7.7	แบบจำลองการลัดวงจรของระบบรางไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงบูสเตอร์	448
รูปที่ 7.8	แบบจำลองการลัดวงจรของระบบรางไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงออโต	451
รูปที่ 7.9	แบบจำลองการลัดวงจรของระบบรางไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงออโต	452
รูปที่ 7.10	กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากระแสตรง	454

รูปที่ 7.11	ลักษณะสมบัติของการประมาณกระแสลัดวงจร ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง	455
รูปที่ 7.12	วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายคอนเวอร์เตอร์	455
รูปที่ 7.13	เส้นโค้งสำหรับอ่านค่า I_d ตามมาตรฐาน IEC 61660-1	456
รูปที่ 7.14	เส้นโค้งสำหรับอ่านค่า x_d ตามมาตรฐาน IEC 61660-1	457
รูปที่ 7.15	องค์ประกอบของรีเลย์ป้องกัน	460
รูปที่ 7.16	ลักษณะสมบัติการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน	462
รูปที่ 7.17	เส้นโค้งเวลาและกระแสของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน	463
รูปที่ 7.18	การจัดลำดับความสัมพันธ์ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน	466
รูปที่ 7.19	เส้นโค้งเวลาและกระแสของรีเลย์ป้องกัน	470
รูปที่ 7.20	การทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบปกติกรณีป้องกัน สายส่งวงจรขนาน	471
รูปที่ 7.21	หลักการแยกแยะทิศทางของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง	471
รูปที่ 7.22	การทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางกรณีป้องกัน สายส่งวงจรขนาน	472
รูปที่ 7.23	การทำงานของรีเลย์ป้องกันในสายป้อนแบบวงแหวน	474
รูปที่ 7.24	รีเลย์ป้องกันกระแสผลต่าง	481
รูปที่ 7.25	โครงสร้างและหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสผลต่าง	482
รูปที่ 7.26	การวิเคราะห์หม้อแปลงต่อแบบ Y-Y	483
รูปที่ 7.27	การไหลของกระแสเหนี่ยวนำที่สัมพันธ์กับการต่อขดลวด	484
รูปที่ 7.28	หลักการทำงานของรีเลย์กระแสผลต่างแบบหลายขดลวด	486
รูปที่ 7.29	โครงสร้างขดลวดของรีเลย์กระแสผลต่างแบบหลายขดลวด	487
รูปที่ 7.30	โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันระยะทาง	493
รูปที่ 7.31	โครงสร้างของรีเลย์ป้องกันระยะทาง	493
รูปที่ 7.32	โครงสร้างของรีเลย์โมห์	494
รูปที่ 7.33	แผนภาพอิมพีแดนซ์ของรีเลย์โมห์	494
รูปที่ 7.34	แผนภาพอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางรูปแบบต่าง ๆ	495

รูปที่ 7.35	การปรับตั้งรีเลย์ป้องกันระยะทาง	495
รูปที่ 7.36	ระบบสายจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าทางไกล	498
รูปที่ 7.37	ลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของระบบป้องกันระยะทาง	499
รูปที่ 7.38	การลัดวงจรในระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าทางไกล	500
รูปที่ 7.39	การพิจารณาเขตป้องกันที่ 2 (กรณีที่ 1)	501
รูปที่ 7.40	การพิจารณาเขตป้องกันที่ 2 (กรณีที่ 2)	502
รูปที่ 7.41	ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบ 1 เฟส	506
รูปที่ 7.42	การวางอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แบบ 1 เฟส	506
รูปที่ 7.43	ระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบ 2 เฟส	507
รูปที่ 7.44	การวางอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แบบ 2 เฟส	507
รูปที่ 7.45	การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบ 1 เฟส 1	508
รูปที่ 7.46	การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบ 1 เฟส 2	509
รูปที่ 7.47	การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับแบบ 2 เฟส	509
รูปที่ 7.48	การป้องกันหม้อแปลงออโตสำหรับระบบรถไฟฟ้าทางไกล	510
รูปที่ 7.49	การป้องกันระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทางไกลแบบทางคู่	511
รูปที่ 7.50	การป้องกันหม้อแปลงที่เชื่อมต่อขดลวดแบบสกอตต์	511
รูปที่ 7.51	การเชื่อมต่อวงจรจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทางไกล	512
รูปที่ 7.52	แผนภาพวงจรเส้นเดียวของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับ รถไฟฟ้าทางไกล	513
รูปที่ 7.53	การป้องกันด้วยระยะปลอดภัย	514
รูปที่ 7.54	การป้องกันด้วยสิ่งกีดขวาง	515
รูปที่ 7.55	การต่อลงดินของระบบ TN ในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับ	516
รูปที่ 7.56	การต่อลงดินของระบบ TN ในระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง	517
รูปที่ 7.57	กระแสรั่วจากทางวิ่งในวงจรจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรง	518
รูปที่ 7.58	การเผ้าตรวจสอบภัยไฟฟ้าของทางวิ่ง	521

รูปที่ 7.59	อันตรายจากแรงดันสัมผัสที่เกิดจากการลัดวงจร	530
รูปที่ 7.60	อันตรายจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำวที่เกิดจากฟ้าผ่า	530
รูปที่ 7.61	การทดสอบแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำวที่เกิดจากการลัดวงจร	531

ภาคผนวก ก

รูปที่ ก.1	โครงสร้างเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน	550
รูปที่ ก.2	การทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	550
รูปที่ ก.3	การวางตัวของขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้า	551
รูปที่ ก.4	เครื่องกลไฟฟ้าชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก	552
รูปที่ ก.5	กฎมือขวา	552
รูปที่ ก.6	สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์และจากสเตเตอร์	553
รูปที่ ก.7	การทำงานของคอมมิวเตเตอร์ในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	554
รูปที่ ก.8	การต่อขดลวดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	554
รูปที่ ก.9	วงจรสมมูลของแบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงต่อแบบผสม	556
รูปที่ ก.10	การเปรียบเทียบคุณสมบัติแรงบิดและความเร็วรอบ ของมอเตอร์กระแสตรง	556
รูปที่ ก.11	โครงสร้างของสเตเตอร์	558
รูปที่ ก.12	ฟลักซ์แม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดทั้ง 3 ชุด	558
รูปที่ ก.13	สนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องกลไฟฟ้า 3 เฟส	558
รูปที่ ก.14	สเตเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กจำนวน 4 ชุด	559
รูปที่ ก.15	เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก	560
รูปที่ ก.16	เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิด 4 ขั้วแม่เหล็ก	560
รูปที่ ก.17	โครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	562
รูปที่ ก.19	เส้นโค้งคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	564
รูปที่ ก.20	การแบ่งชั้นของมอเตอร์	564
รูปที่ ก.21	องค์ประกอบของชุดขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้	565
รูปที่ ก.22	แรงดันและกระแสจากอินเวอร์เตอร์ของการขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้	565
รูปที่ ก.23	โครงสร้างพื้นฐานของไดโอด	567

รูปที่ ก.24	เส้นโค้งกระแส-แรงดันของไดโอด	567
รูปที่ ก.25	โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์	568
รูปที่ ก.26	เส้นโค้งกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์	569
รูปที่ ก.27	โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำและสัญลักษณ์ของจีโอ	570
รูปที่ ก.28	โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำและสัญลักษณ์ของบีเจทีกำลัง	570
รูปที่ ก.28	โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำและสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลัง	571
รูปที่ ก.29	โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำและเส้นโค้งกระแส-แรงดันของไอจีบีที	571
รูปที่ ก.30	พิกัดกระแสและแรงดันทำงานของอุปกรณ์ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	572
รูปที่ ก.31	พิกัดความหนาแน่นกระแสและความถี่ทำงานของ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	573

ภาคผนวก ข

รูปที่ ข.1	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเสาโครงเหล็ก	575
รูปที่ ข.2	การจัดสายสำหรับสายส่ง 1 วงจร	576
รูปที่ ข.3	การจัดวงจรของสายส่งโครงเหล็ก	576
รูปที่ ข.4	ตัวอย่างเสาปูนสำหรับระบบจำหน่ายแรงต่ำ	578
รูปที่ ข.5	เสาปูนสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV	579
รูปที่ ข.6	ตัวนำทรงกระบอก	581
รูปที่ ข.7	ผลของปรากฏการณ์ทางผิวต่อความต้านทานของสายตัวนำ	582
รูปที่ ข.8	ฟลักซ์เชื่อมโยงที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวนำเดี่ยว	584
รูปที่ ข.9	สายส่งไฟฟ้ากำลัง 1 เฟส	586
รูปที่ ข.10	สายส่งไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส จัดวางตัวนำแบบสมมาตร	588
รูปที่ ข.11	การจัดวางตัวนำแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส	589
รูปที่ ข.12	สนามไฟฟ้าของระบบตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม	580
รูปที่ ข.13	สายส่ง 1 เฟส ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลมและมีรัศมีเท่ากัน	591
รูปที่ ข.14	การพิจารณาความจุเทียบกับจุดนิวทรัล	591
รูปที่ ข.15	การวางตัวของสายส่งตัวนำ 3 เฟส	592

ภาคผนวก ค

รูปที่ ค.1	กระบวนการประมาณผลเฉลี่ยด้วยวิธีเกาส์ซีเดล	595
รูปที่ ค.2	กระบวนการประมาณผลเฉลี่ยด้วยวิธีนิวตันราฟสัน	597
รูปที่ ค.3	บัลในระบบไฟฟ้ากำลัง	598

สารบัญตาราง

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV	56
---	----

บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานอุณหภูมิขดลวดไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60085	98
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะและลักษณะสมบัติของรถไฟความเร็วสูง	178

บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850	188
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ กระแสสลับ	227
ตารางที่ 4.3 ระยะทางการจ่ายไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ (ทางเดียว)	229
ตารางที่ 4.4 ขนาดของการติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้าริมทาง	231
ตารางที่ 4.5 สภาพต้านทานสูงสุดและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวนำสัมผัส	234
ตารางที่ 4.6 ความต้านทานของตัวนำสัมผัสต่อกิโลเมตรสูงสุด	234
ตารางที่ 4.7 การเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60146-1-1	266
ตารางที่ 4.8 การแบ่งชั้นภาระการจ่ายโหลดในงานระบบรถไฟฟ้า	267

บทที่ 5

ตารางที่ 5.1 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำใด ๆ ($m\Omega/km$)	301
ตารางที่ 5.2 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำแคทีแนรี ($m\Omega/km$)	302
ตารางที่ 5.3 ลักษณะสมบัติของทางวิ่งที่ใช้งาน	303
ตารางที่ 5.4 ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของรางตัวนำ ($m\Omega/km$)	303
ตารางที่ 5.5 อิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวของระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ (DB) ที่รวมผลของรางวิ่ง ในหน่วย $m\Omega/km$ พารามิเตอร์สำหรับ ระบบไฟฟ้าความถี่ 50 Hz	304

บทที่ 6

ตารางที่ 6.1 ความเร่งมาตรฐานของงานบริการเดินรถไฟประเภทต่าง ๆ 386

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ μ_0 ของการรถไฟประเทศต่าง ๆ 393

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ข้อแตกต่างของเครื่องกลไฟฟ้า 3 ชนิด 541

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 การกำหนดระยะห่างระหว่างเสาและเขตแนวเดินสายไฟฟ้า 577

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุบางชนิด 582

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 สัญลักษณ์และหมายเลขรหัสรีเลย์ 616

คำย่อภาษาอังกฤษ

1QC	One quadrant control
2QC	Two quadrant control
4QC	Four quadrant control
AAAC	All aluminium alloy conductor
AAC	All aluminium conductor
ACSR	Aluminium conductor steel reinforced
AFD	Adjustable frequency drive
AGV	Automotrice à grande vitesse
APT	Advance passenger train
AREA	American railway engineering association
ARL	Airport rail link (Suvarnabhumi airport)
AT	Autotransformer
ATC	Automatic train control
ATO	Automatic train operation
ATS	Automatic train supervision
AW	Weatherproof aluminium conductor
AWS	Automatic warning system
BS	Block section/Bus section
BSS	Bulk substation
BT	Booster transformer
BTS	Bangkok transit system
CB	Circuit breaker
CIM	Current injection method
CNR	China north locomotive and rolling stock
CRH	China railway high speed

CSI	Current source inverter
CT	Current transformer
CTS	Current tap setting
CW	Contact wire
DB	Deutsche Bahn
DCM	Discontinuous conduction mode
DMU	Diesel multiple unit
EC	EuroCity
ECML	East coast main line
EHV	Extra high voltage
EIT	Extremely inverse time
EMU	Electric multiple unit
ERTMS	European railway traffic management system
ETCS	European train control system
FL	Feeder line
FS	Feeder substation
GMR	Geometric mean radius
GSA	Gauss-Seidel method with accelerating factor
GSM	Gauss-Seidel method
GSM-R	Global system mobile-railway
GTR	Giant transistor
GWML	Great western main line
HSC	High strength copper
HST	Intercity high-speed train
HV	High voltage
ICB	Interconnecting circuit breaker
ICE	InterCity-Express

IGCT	Insulated gate commutated thyristor
IRJ	Insulated rail joint
ITSC	Intermediate track sectioning cabin
JNR	Japanese national railway
kph	Kilometer per hour
KTX	Korea train express
LCB	Line circuit breaker
LRT	Light rail transit
LTi	Long time inverse
LV	Low voltage
MEA	Metropolitan electric authority of Thailand
MML	Midland main line
MOSFET	Metal-oxide field effect transistor
MPTSC	Mid-point track sectioning cabin
MRT	Mass rapid transit
MRT	Metropolitan rapid transit (Bangkok)
MV	Medium voltage
MW	Messenger wire
NEC	National electrical code
NOP	No operation
NS	Neutral section
O/C	Overcurrent
OCL	Overhead contact line
PAC	Pre-assembly aerial cable
PE	Polyethylene
PIV	Peak inverse voltage
PMSM	Permanent magnet synchronous motor

PSM	Plug setting multiplier
PVC	Polyvinyl chloride
PWM	Pulse-width modulation
RC	Return circuit
RCB	Rectifier circuit breaker
RMS	Root mean square
RSR	Royal state railway of Siam
SAC	Spaced aerial cable
SC	Sectioning cabin
SCC	Short circuit capacity
SCR	Silicon controlled rectifier
SCW	Single contact wire
SEP-EX	Separately-excited DC motor
SIT	Standard inverse time
SOR	Successive over-relaxation method
SP	Sectioning post
SR	Speed regulation
SRT	State railway of Thailand
SSS	Service substation
T-bus	Trolley bus
TDS	Time-dial setting/Time-delay setting
TE	Tractive effort
TGV-PSE	TGV Paris-south-east
THSR	Taiwan high speed rail
TL	Traffic load
TN	Terre-neutral
TPS	Traction power substation

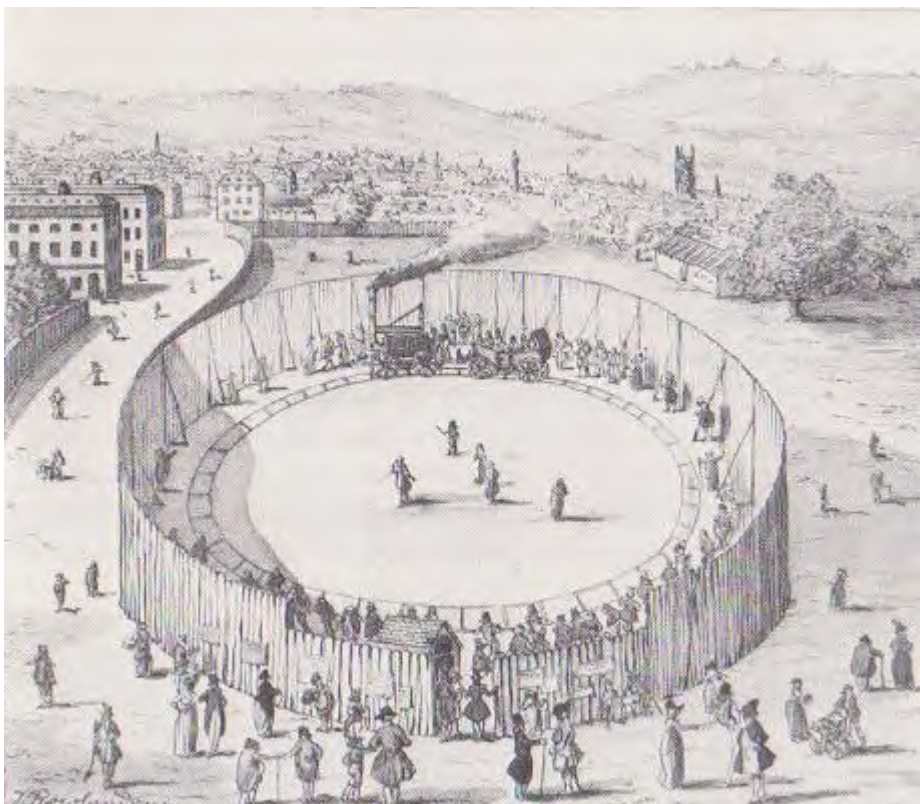
TPWS	Train protection and warning system
TRTA	Teito rapid transit authority
TSS	Traction substation
TT	Terre-terre
UHV	Ultra-high voltage
VCO	Voltage controlled oscillator
VFVS	Variable frequency voltage source
VIT	Very inverse time
VLD	Voltage limiting device
VSI	Voltage source inverter
VUF	Voltage unbalance factor
VVI	Varied voltage inverter
WCML	West coast main line
XLPE	Cross-link polyethylene

1.1 กล่าวนำ

ระบบรถไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีเก่าที่ร่วมสมัย มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องมาตลอดเวลา ถึงแม้เทคโนโลยีรถไฟฟ้ามีมานานแล้ว แต่องค์ความรู้ในประเทศไทยอยู่ในช่วงเริ่มต้น งานทางด้านรถไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เน้นการวางแผนเส้นทาง การจัดการจราจร งานด้านโครงสร้าง ราง ทางรถไฟ ตู้โดยสารและเทคโนโลยีหัวลาก ระบบรถไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าผ่านทางวิ่งไม่ได้รับการพัฒนาให้ใช้ในประเทศไทยมาจนกระทั่งทศวรรษที่ 90 โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพ (Bangkok Transit System: BTS) ได้เปิดใช้งานขึ้นและเป็นการเริ่มต้นยุคสมัยใหม่ของพัฒนาการรถไฟฟ้าในประเทศไทย หลังจากนั้น รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (Metropolitan Rapid Transit: MRT Blue Line) และรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (Airport Rail Link: ARL) เป็นโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ดำเนินการตามมา จนกระทั่งในปัจจุบัน โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงที่กำลังดำเนินการก่อสร้างและเปิดใช้งานในปี 2559 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินและสายสีเขียวส่วนต่อขยาย โครงการรถไฟฟ้าสายสีแดง โครงการรถไฟฟ้าสายสีส้ม และสายสีอื่น ๆ ที่อยู่ในช่วงศึกษาความเป็นไปได้และวางแผนโครงการรถไฟฟ้าทางคู่ และรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่อยู่ระหว่างการเจรจาเพื่อดำเนินการ [1.1] – [1.5] ส่งผลให้งานด้านระบบรถไฟฟ้ามีบทบาทที่สำคัญสำหรับการวางแผนและการปฏิบัติการระบบรถไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรางรถไฟที่มีความแตกต่างจากระบบจ่ายไฟฟ้าที่มีอยู่ของการไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาระบบรถไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ เช่น รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน รถไฟฟ้าสายหลัก หรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง เป็นต้น มีความจำเป็นต้องศึกษาในส่วนของระบบจ่ายไฟฟ้า ความปลอดภัยทางไฟฟ้า การป้องกันทางไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้า การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้พลังงานและระบบเก็บสะสมพลังงาน การศึกษานี้มีส่วนสัมพันธ์กับการจัดการเวลาและการควบคุมการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วย

1.2 วิวัฒนาการของระบบขนส่งทางราง

พาหนะเพื่อการขนส่งสินค้าที่อาศัยกำลังลากจากสัตว์ประเภทม้า วัว ช้าง หรืออื่น ๆ มีใช้งานมาตั้งแต่ครั้งโบราณกาล จนกระทั่งถึงยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงศตวรรษที่ 17 - 18 ที่ทำให้ความต้องการเชื้อเพลิง วัตถุดิบและสินค้าประเภทต่าง ๆ เติบโตขึ้นอย่างมาก การขนส่งในระยะทางไกลข้ามมหาสมุทรหรือข้ามทวีปเป็นสิ่งที่จำเป็น ในช่วงเริ่มต้นนี้ การพัฒนาเครื่องจักรไอน้ำมีบทบาทเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพียงแต่นำไปใช้ที่เครื่องกลเรือเป็นสำคัญ เนื่องจากต้องการเครื่องจักรไอน้ำความดันต่ำ ไม่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดและน้ำหนักบรรทุกมากนัก และผิวน้ำค่อนข้างราบเรียบ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องจักรสำหรับการขนส่งบนพื้นที่ต้องมีเรื่องความลาดชันมาเกี่ยวข้องด้วย เรือกลไฟ (steamship) จึงมีพัฒนาการที่ก้าวหน้ามากในยุคนั้น



รูปที่ 1.1 งานแสดงรถจักรไอน้ำวิ่งบนรางเหล็กครั้งแรกในปี ค.ศ. 1804

ที่มา: <http://www.edgehillstation.co.uk/> (2559)

ต้องรอจนกระทั่งได้พัฒนาเครื่องจักรไอน้ำความดันสูงและเทคโนโลยีการผลิตเหล็กกล้า Richard Trevithick [1.6] ได้ทดสอบเครื่องจักรไอน้ำให้วิ่งบนรางสำเร็จเป็นครั้งแรก ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 1804 ดังรูปที่ 1.1 จึงทำให้พัฒนาการของรถไฟที่วิ่งบนรางเหล็กมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ในปี ค.ศ. 1810 เทคโนโลยีเครื่องจักรไอน้ำวิ่งบนรางเหล็กได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในเหมืองถ่านหิน ในปี ค.ศ. 1825 ได้เริ่มเปิดให้บริการรถไฟสาธารณะขึ้นครั้งแรกในประเทศอังกฤษระหว่างเมือง Stockton และเมือง Darlington ประมาณปี ค.ศ. 1830 ประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป ได้เริ่มเปิดให้บริการรถไฟในช่วงเวลานั้น ปี ค.ศ. 1835 การทดสอบหัวรถจักรได้ทำความเร็วสูงสุดได้ประมาณ 100 km/h ที่ประเทศอังกฤษ ได้ความเร็ว 144 km/h ในปี ค.ศ. 1890 ที่ประเทศฝรั่งเศส และทำได้ถึง 213 km/h ในปี ค.ศ. 1903 ที่ประเทศเยอรมัน (ความเร็วของการให้บริการจริงอาจจะทำได้เพียงหนึ่งในสาม หรือครึ่งหนึ่งของความเร็วทดสอบเท่านั้น)



รูปที่ 1.2 รถจักรไฟฟ้าทดสอบในงาน Berlin Fair ปี ค.ศ. 1879

ที่มา: <http://www.akg-images.co.uk/archive/-2UMDHUFHOZ8V.html> (2559)

ประมาณปี ค.ศ. 1820 Andre Marie Ampere และ Michael Faraday ได้ค้นพบแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของตัวนำโลหะ ซึ่งต่อมากลายเป็นต้นกำเนิดของแหล่งจ่ายกำลังงานให้รถไฟ ช่วงปี ค.ศ. 1836 ได้มีการทดสอบรถรางไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สกอตแลนด์ มอเตอร์ที่ใช้ในขณะนั้นเป็นแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ (switch reluctance motor) การทดสอบครั้งนั้นไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดกำลังงานจากเซลล์แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพต่ำ จนกระทั่งประมาณปี ค.ศ. 1860 เมื่อ Werner von Siemens และ

Sir Charles Wheatstone ได้ค้นพบหลักการของไดนาโมทำให้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายพลังงานได้ไม่จำกัดขึ้น ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และในปี ค.ศ. 1879 Siemens ได้แสดงรถจักรไฟฟ้าที่วิ่งบนรางเป็นครั้งแรกที่กรุงเบอร์ลิน [1.7] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 มีลักษณะคล้ายรถรางไฟฟ้า (electric tram) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 2.2 kW ขับเคลื่อนให้วิ่งได้ด้วยความเร็วประมาณ 13 km/h ต่อมา ในปี ค.ศ. 1882 ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นรถรางไฟฟ้า และรถรางสำหรับงานเหมืองแร่ที่จ่ายไฟฟ้าด้วยระบบสายจ่ายตัวนำพาอากาศแบบสัมผัส (overhead contact line)



รูปที่ 1.3 สถานีเรียงกระแสไอปรอท ที่สถานีจ่ายไฟ Arnos Grove สาย Piccadilly รถไฟใต้ดินกรุงลอนดอน ปี ค.ศ. 1933

ที่มา: Michael C. Duffy, Electric Railways: 1880-1990, IET, 2003, p. 181

ระบบรถไฟไฟฟ้าที่เป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีรูปแบบที่ใช้มาจนถึงปัจจุบันเปิดใช้งานอย่างเป็นทางการครั้งแรกที่สหรัฐอเมริกา โดย Baltimore & Ohio Railroad [1.8] เป็นระบบรถไฟไฟฟ้าจ่ายผ่านสายตัวนำพาดอากาศแบบสัมผัส จ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 675 V วิ่งในอุโมงค์ระยะทาง 5 km รถจักรไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 270 kW จำนวน 4 ตัว ในขณะนั้น พิกัดแรงดันทำงานสูงสุดของคอมมิวเตเตอร์อยู่ที่ประมาณ 750 V เท่านั้น และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของกำลังงานสูญเสียในสายจ่ายไฟฟ้าเมื่อต้องใช้ส่งไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ในเวลานั้น การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงมีราคาสูงมาก ไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ในปี ค.ศ. 1903 Hans Behn-Eschenburg [1.8] ได้พัฒนาให้มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมทำงานได้โดยการจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ถือเป็นจุดเริ่มต้นของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟ ในปี ค.ศ. 1912 ได้มีการจัดตั้งมาตรฐานการขนส่งระบบรางไฟฟ้าขึ้นประกอบด้วยพื้นที่ในปกครองของประเทศเยอรมัน ใช้ระบบไฟฟ้า 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz ความถี่ต่ำนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดแรงดันตกเหนี่ยวนำในสายจ่ายและไม่ก่อให้เกิดการอาร์กที่ตัวคอมมิวเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ งาน ต่อมาได้แพร่หลายออกไปในทวีปยุโรปประกอบด้วยออสเตรีย สวีเดน สวิสเซอร์แลนด์ และนอร์เวย์ เป็นต้น

การใช้งานความถี่ต่ำสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นทำให้เกิดภาระหนักแก่ผู้ให้บริการรถไฟในขณะนั้น ในปี ค.ศ. 1902 Peter Cooper Hewitt [1.8] ได้ประดิษฐ์ตัวเรียงกระแสไอปรอท (mercury-vapor rectifier) ทำหน้าที่เรียงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้ต้นทุนการแปลงกระแสไฟฟ้านี้มีราคาถูกลงเมื่อเทียบกับการใช้อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์แบบโรตารี (rotary converter) การพัฒนานี้ได้รับการทดสอบยืนยันถึงประสิทธิภาพการใช้งานกับรถจักรไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1936 ทำให้สามารถนำระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่กำลัง 50 Hz หรือ 60 Hz มาใช้งานได้ โดยผ่านตัวเรียงกระแสไอปรอทนี้ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังรูปที่ 1.3 [1.9] ก่อนจะเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในช่วงหลายทศวรรษถัดมา หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ประเทศฝรั่งเศสได้มีการวิจัยพัฒนาเพื่อนำระบบไฟฟ้า 25 kV 50 Hz มาใช้งานจนได้รับความนิยมแพร่หลายจนถึงปัจจุบันและเป็นระบบจ่ายไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับรถไฟสายหลักและรถไฟ

ความเร็วสูงทั่วโลก ในปี ค.ศ. 1979 ได้นำเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส มาใช้งาน จนกระทั่งในทศวรรษที่ 90 เทคโนโลยีขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ได้รับการยอมรับและใช้เป็นมาตรฐานสำหรับรถไฟความเร็วสูง รถไฟฟ้าขนส่งสินค้า และรถไฟขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟสนี้ไม่ได้รับไฟฟ้าจากสายจ่ายที่รางรถไฟด้วยระบบ 3 เฟส โดยยังคงรับไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จากสายจ่ายไฟฟ้าพาดอากาศแบบสัมผัสเหมือนเดิม แต่ใช้วงจรเรียงกระแสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส บนขบวนรถไฟ

สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่ใช้ตัวนำ 3 ชุด ได้มีการทดลองใช้งานในประเทศเยอรมัน ฝรั่งเศส และทางตอนเหนือของอิตาลีที่ Simplon Tunnel ในปี ค.ศ. 1904 [1.8] ด้วยพิกัดแรงดัน 3400 VAC 15.8 Hz จ่ายไฟฟ้าผ่านสายพาดอากาศแบบสัมผัส 2 เฟส และอีกหนึ่งเฟสจ่ายผ่านราง ดังรูปที่ 1.4 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1930 ได้เปลี่ยนมาใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz



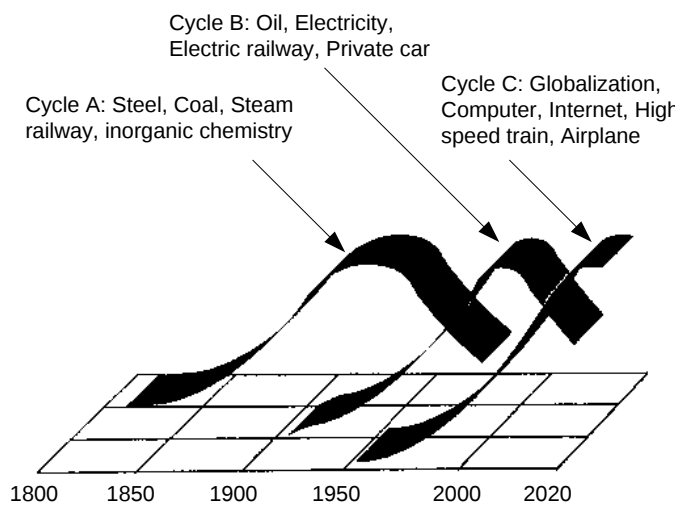
รูปที่ 1.4 Simplon Tunnel และรถจักรไฟฟ้า 3 เฟส

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Simplon_Tunnel (2559)

1.3 อุตสาหกรรมรถไฟ

อุตสาหกรรมรถไฟเริ่มต้นตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งแรก เริ่มจากเทคโนโลยีรถจักรไอน้ำ เน้นใช้งานขนส่งเหล็กกล้า ถ่านหินและงานเหมืองแร่เป็นหลัก หลังปี ค.ศ. 1850 อุตสาหกรรมรถไฟกำเนิดขึ้นในรูปบริษัทเอกชนที่ลงทุนสร้างโครงสร้างพื้นฐานระบบรถไฟและควบคุมการเดินรถไฟด้วย อย่างไรก็ตาม การลงทุนในอุตสาหกรรมรถไฟได้ผลตอบแทนต่ำ ยิ่งไปกว่านั้น ยุทธศาสตร์การวางระบบโครงข่าย

รถไฟเป็นเรื่องที่สำคัญเกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจและความมั่นคงของแต่ละประเทศ ทำให้ในปี ค.ศ. 1935 รัฐบาลในหลายประเทศได้ยึดครองกิจการมาผูกขาดโดยรัฐซึ่งทำให้เกิดผลดีบางประการในด้านการเชื่อมต่อระบบคมนาคมขนส่งภายในประเทศ แต่ทำให้เกิดการผูกขาดการบริการ มีการปรับตัวและพัฒนาช้า ในปี ค.ศ. 1950 กิจการในรูปแบบรัฐวิสาหกิจนี้เริ่มประสบปัญหาและต้องมีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้ง การให้สัมปทานเดินรถไฟแก่บริษัทเอกชนเพื่อแข่งขันการให้บริการเดินรถไฟ หรือบางประเทศแบ่งสัมปทานให้บริษัทคู่และบรรดา ในช่วงนี้เป็นยุคของการพัฒนาระบบรางไฟฟ้าและรถยนต์นั่งส่วนบุคคล มีอุตสาหกรรมน้ำมันเข้ามามีอิทธิพลต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ หลังปี ค.ศ. 2000 อิทธิพลของโลกาภิวัตน์ที่มีคอมพิวเตอร์และการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเป็นเครื่องมือสำคัญ ยุคนี้ถือว่าเป็นยุคของอุตสาหกรรมทางสารสนเทศ การบินพาณิชย์ และระบบรถไฟความเร็วสูง ดังรูปที่ 1.5 แสดงวัฏจักรการพัฒนาทางเศรษฐกิจ 3 วงรอบ ที่แบ่งการพัฒนาการขนส่งออกเป็น 3 ยุค [1.10]

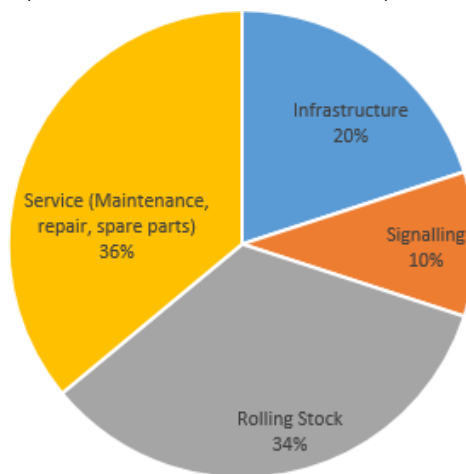


รูปที่ 1.5 วัฏจักรการพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีการขนส่ง

ที่มา: V.A. Profillidis, *Railway management and engineering*, Ashgate, 2012

หลังจากเริ่มต้นทศวรรษที่ 90 ประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรปได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบโครงข่ายการขนส่งทางราง รวมถึงการปรับโครงสร้างองค์กรรับผิดชอบการบริหารจัดการเดินรถไฟ การแปรรูปองค์กรของรัฐเป็นเอกชน (privatization) ที่

ไม่ได้ผูกขาดหรือควบคุมโดยรัฐ (deregulation) เกิดการล้มละลายและการควบรวมกิจการของเอกชนผู้ให้บริการ การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมรถไฟอย่างมาก สายการผลิต โรงงานประกอบต่าง ๆ ได้ย้ายไปในประเทศที่มีค่าจ้างแรงงานที่ถูกกว่า ส่วนใหญ่อยู่ในยุโรปตะวันออก ผลจากการควบรวมกิจการต่าง ๆ ทำให้บริษัทที่เดิมทำงานออกแบบทางวิศวกรรมให้กับระบบขับเคลื่อนต่าง ๆ ของขบวนรถไฟ เช่น Henschel Krauss-Maffei Krupp และ SACM ได้ถูกผนวกเข้าไปเป็นแผนกหนึ่งในบริษัทข้ามชาติขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะเป็น ABB AEG ALSTOM และ SIEMENS ในปี ค.ศ. 2001 บริษัท Bombardier ได้ซื้อกิจการ ADtranz ซึ่งเป็นผู้ผลิตอุปกรณ์ทางด้านระบบราง จากกลุ่ม Daimler-Chrysler [1.11]

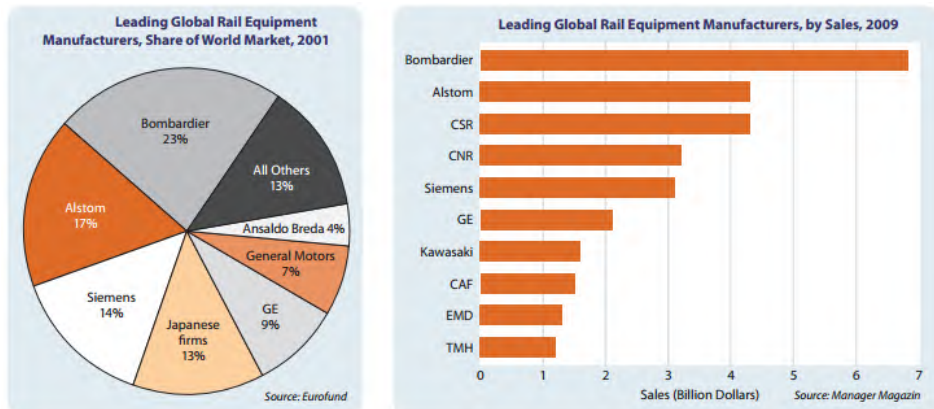


รูปที่ 1.6 มูลค่าของส่วนแบ่งการตลาดในงานอุตสาหกรรมรถไฟในปี 2003 – 2005

ที่มา: M. Renner and G. Gardner, Global competitiveness in the rail and transit industry, Worldwatch Institute, 2010

อุตสาหกรรมรถไฟประกอบด้วยภาคส่วนต่าง ๆ ที่หลากหลาย สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ เช่น ล้อเลื่อน (rolling stock) โครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) อาณัติสัญญาณ (signalling) งานบำรุงรักษาและบริการ (maintenance and service) มูลค่าของภาคส่วนต่าง ๆ มีมูลค่ารวม 72 พันล้านยูโร (100%) เป็นข้อมูลในปี ค.ศ. 2003 – 2005 แสดงไว้ในแผนภูมิในรูปที่ 1.6 [1.10] งานบำรุงรักษาเป็นส่วนที่มีมูลค่ารวมสูงถึง 36% มูลค่าในส่วนนี้รวมการบำรุงรักษาระบบราง อาณัติสัญญาณ ล้อเลื่อน และอื่น ๆ ในขณะที่ส่วนของล้อเลื่อนมีส่วนแบ่งอยู่

ที่ประมาณ 34% ในส่วนงานล้อเลื่อนนี้ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ ได้ โดยมี Multiple Unit เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางตลาดสูงสุด 28% หัวรถจักร (locomotive) มีสัดส่วน 22.3% ในขณะที่รถไฟความเร็วสูงมีสัดส่วนที่ 14.2% ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลที่ประเมินในช่วงปี ค.ศ. 2006 – 2015



รูปที่ 1.7 ส่วนแบ่งการตลาดในอุตสาหกรรมรถไฟเปรียบเทียบในปี 2001 และ 2009

ที่มา: M. Renner and G. Gardner, Global competitiveness in the rail and transit industry, Worldwatch Institute, 2010

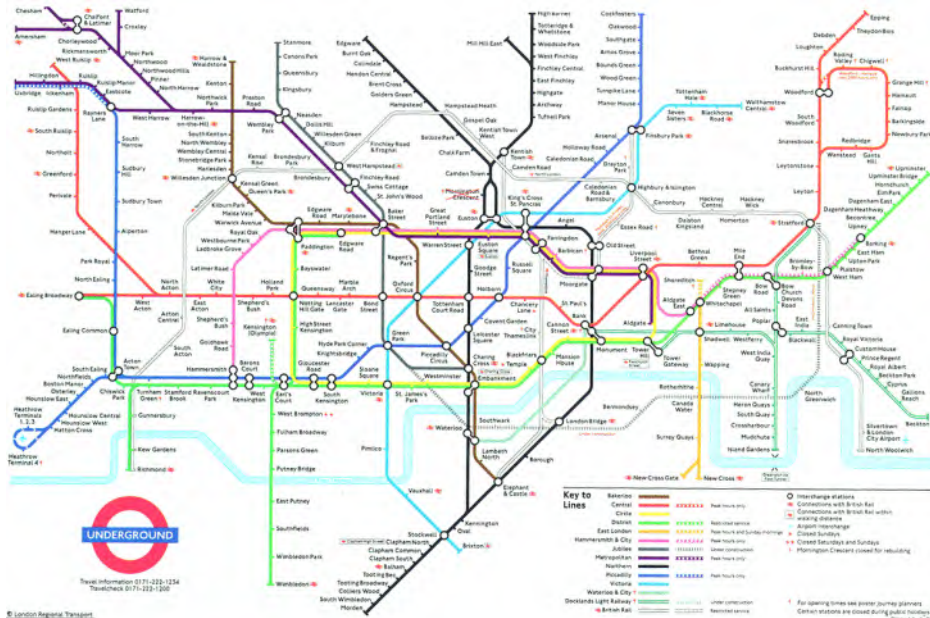
ในทศวรรษปัจจุบัน ผู้ผลิต 3 อันดับแรก ประกอบด้วย Bombardier ALSTOM และ SIEMENS มีสัดส่วนการครองตลาดรวมทั้งหมดเกินครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตจากประเทศจีนได้มีส่วนแบ่งเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้อันดับ 3 อย่าง SIEMENS เริ่มมีสถานะไม่มั่นคง [1.11] จากรูปที่ 1.7 เห็นได้ชัดเจนว่า ในปี ค.ศ. 2009 CSR (China South Locomotive and Rolling Stock) และ CNR (China North Locomotive and Rolling Stock) มีผลประกอบการแซงหน้า SIEMENS ส่วนใหญ่เป็นผลการขยายกิจการในประเทศจีนที่ดำเนินการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้ามหานครขนาดใหญ่ของจีนและระบบรถไฟความเร็วสูงในประเทศ เป็นที่น่าสนใจว่า หลังจากปี ค.ศ. 2015 เมื่อจีนพยายามขยายตลาดไปยังยุโรป สหรัฐอเมริกา แอฟริกา และเอเชีย มูลค่าส่วนแบ่งของภาคส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมรถไฟจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ

1.4 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การขนส่งมวลชนของมหานครต่าง ๆ ทั่วโลกมีแนวโน้มที่จะใช้รูปแบบของการขนส่งระบบรางที่อาจมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกัน เช่น รถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟฟ้าเหนือดิน หรือรถไฟฟ้ารางเดี่ยว ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีประวัติศสาตร์ยาวนานมาประมาณเกือบ 200 ปี มหานครสำคัญขนาดใหญ่ทั่วโลกมีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ซับซ้อน เช่น กรุงลอนดอน กรุงปารีส กรุงเบอร์ลิน กรุงมอสโก กรุงโตเกียว กรุงปักกิ่ง กรุงโซล หรือ มหานครเซี่ยงไฮ้ เป็นต้น ประวัติศาสตร์การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของเมืองต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ในส่วนนี้จะนำเสนอในรูปแบบของการสรุประบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของมหานครที่สำคัญ 3 ตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการศึกษา ประกอบด้วย กรุงลอนดอน กรุงปารีส และกรุงโตเกียว ดังต่อไปนี้

1.4.1 รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน

รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอน (London Underground) [1.12] – [1.13] ในปัจจุบัน (ค.ศ. 2015 ปีที่เริ่มเขียนตำราฉบับนี้) บริหารกิจการโดยบริษัท London Underground มีจำนวนทั้งสิ้น 11 เส้นทาง รวม 270 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 1.8 รวมระยะทางทั้งสิ้น 402 km รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอนมีโครงสร้าง 2 รูปแบบ โครงสร้างแบบแรกวางต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อย (sub-surface) สายที่มีโครงสร้างแบบนี้ประกอบด้วย สาย Circle สาย District สาย Hammersmith & City และ สาย Metropolitan ใช้ขบวนรถให้บริการขนาดใหญ่ โครงสร้างของสาย อุโมงค์และขบวนรถเป็นรูปแบบเดียวกันกับระบบทางรถไฟสายหลักของอังกฤษ (British mainline) โครงสร้างแบบที่สองเป็นอุโมงค์ฝังลึกลงไปใต้ดิน (deep-tube) สายที่มีโครงสร้างแบบนี้ประกอบด้วย สาย Bakerloo สาย Central สาย Jubilee สาย Northern สาย Piccadilly สาย Victoria และ สาย Waterloo & City อุโมงค์มีขนาดเล็กแบ่งออกเป็นสองอุโมงค์สำหรับแต่ละทางวิ่ง ใช้ขบวนรถที่มีขนาดเล็กกว่า สายที่ถูกเรียกว่า Tube ที่แท้จริงจะเป็นสายที่มีโครงสร้างนี้ แต่ปัจจุบันคำว่า Tube หมายถึงถึงสายรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงลอนดอนทั้งหมด ทั้งสองโครงสร้างเมื่อออกมาจากพื้นที่ใจกลางเมืองสู่ชานเมือง ทางรถไฟจะถูกยกขึ้นมารองให้บริการบนผิวดิน (surface level)



รูปที่ 1.8 แผนที่ให้บริการรถไฟใต้ดินกรุงลอนดอน

ที่มา: <https://knightsbridge.net/underground-map.html>, 2558



รูปที่ 1.9 รถไฟใต้ดินเปิดให้บริการสายแรกของโลกในปี ค.ศ. 1863

ที่มา: <http://www.telegraph.co.uk/> (2558)

รถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนเริ่มก่อสร้างในปี ค.ศ. 1843 โดย Sir Marc Brunel และเปิดให้บริการในวันที่ 10 มกราคม ค.ศ. 1863 ช่วงระหว่างสถานี Paddington

และสถานี Farringdon Street ในส่วนของสาย Central เป็นรถไฟใต้ดินสายแรกของโลกที่เปิดให้บริการ [1.13] ดังแสดงในรูปที่ 1.9 เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงพัฒนาการของรถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนได้แสดงภาพรถไฟใต้ดินไว้ในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 รถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนปี ค.ศ. 2014

ที่มา: <http://www.huffingtonpost.co.uk/> (2558)

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟใต้ดินกรุงลอนดอนใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงแบบสี่ราง (four-rail DC system) รางตัวนำบวกจ่ายไฟที่ +420 VDC และตัวนำลบจ่ายไฟที่ -210 VDC ทำให้มีแรงดันพิกัดจ่ายให้ขบวนรถ 630 V บัสบาร์ที่สถานีเรียงกระแสของรางตัวนำขั้วบวกและขั้วลบจะติดตั้งตัวต้านทานแบ่งแรงดันในอัตราส่วน 2:1 แท้ปกลางของชุดตัวต้านทานนี้ถูกต่อลงดินและต่อเชื่อมกับรางวิ่งทั้งสองซึ่งเป็นแบบเกจมาตรฐาน (standard gauge) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากปรากฏการณ์กระแสรั่ว (stray current) ที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะในโครงสร้างข้างเคียง ขบวนรถที่ให้บริการมี 2 ขนาด ตามรูปแบบของโครงสร้าง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เป็นต้นมา รถไฟให้บริการเปลี่ยนมาใช้รถไฟฟ้าราง (electric multiple unit: EMU) ทั้งหมด ส่วนใหญ่ขบวนรถไฟให้บริการจะเป็นแบบ 6 ตู้ และ 8 ตู้ ยกเว้นสาย Waterloo & City ที่ใช้

ขบวนรถไฟแบบ 4 ตู้ มีความเร็วให้บริการเฉลี่ย 33 km/h มีจำนวนผู้ใช้บริการประมาณ 3.47 ล้านคนต่อวัน



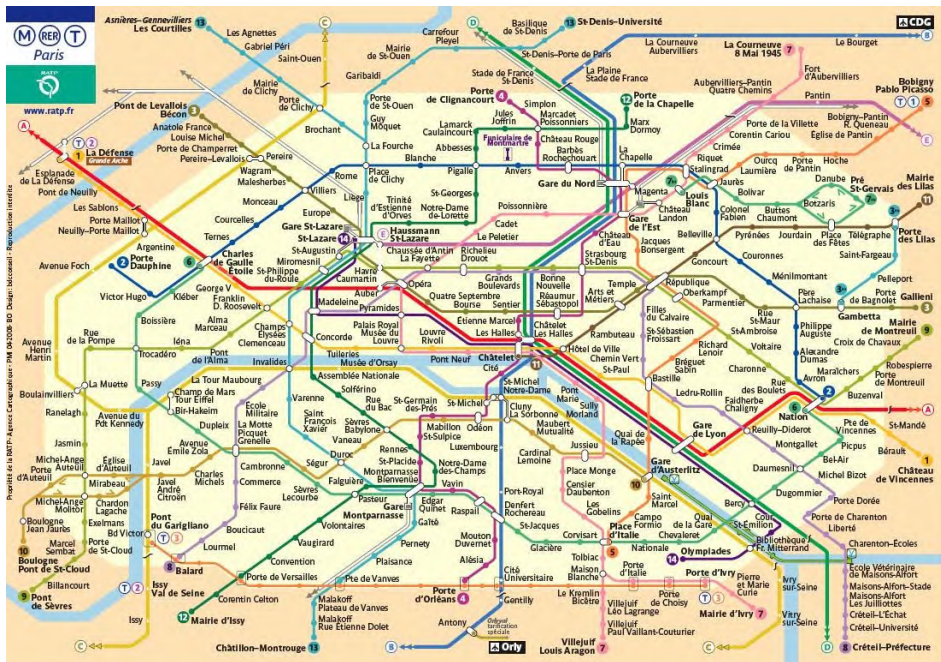
รูปที่ 1.11 การก่อสร้างรถไฟขนส่งมวลชนกรุงปารีสในช่วงปี ค.ศ. 1902 – 1910

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Paris_Metro (2558)

1.4.2 รถไฟขนส่งมวลชนกรุงปารีส

กรุงปารีสเริ่มแผนการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนภายในเขตกลางเมืองและชานเมืองตั้งแต่ปี ค.ศ. 1845 บริษัทรถไฟและรัฐบาลฝรั่งเศสขณะนั้นต้องการขยายทางรถไฟสายหลักของฝรั่งเศสเข้าสู่ใจกลางเมืองในรูปแบบของทางรถไฟใต้ดิน แต่ชาวปารีสต้องการระบบใหม่ที่เป็นอิสระจากการควบคุมของรัฐบาล ทำให้เกิดความเห็นต่างและไม่ได้ข้อยุติจนถึงปี ค.ศ. 1890 การถกเถียงมีหลากหลายเรื่อง แบ่งเป็นหลายช่วง ทั้งการเลือกระบบรถทางไฟใต้ดินหรือรูปแบบทางยกระดับ การเลือกใช้ระยะเกจแบบพิเศษที่ความกว้าง 1300 mm เพื่อป้องกันไม่ให้อำนาจรัฐบาลเข้ามาควบคุมกิจการ หรือการใช้เกจมาตรฐาน 1435 mm ตามระบบทางรถไฟสายหลักของประเทศ ในท้ายที่สุด ในปี ค.ศ. 1895 ข้อสรุปที่เกิดขึ้นทำให้ระบบรถไฟขนส่งมวลชนปารีสเลือกใช้เกจ

มาตรฐานในรูปแบบของทางรถไฟใต้ดิน การก่อสร้างแบ่งออกเป็นหลายระยะ ดังรูปที่ 1.11 เริ่มด้วย Bienvenue's Project ในปี ค.ศ. 1896 ประกอบด้วยระบบรถไฟ 10 สาย ในปัจจุบันโครงการนี้เป็นส่วนของรถไฟขนส่งมวลชนปารีสสาย 1 – 9 ในปี ค.ศ. 1904 บริษัท Nord-Sud ได้ก่อสร้างทางรถไฟเพิ่มเติมอีก 3 สาย ในขณะนั้นเรียกว่า สาย A (ปัจจุบัน คือ สาย 12) สาย B (ปัจจุบัน คือ สาย 12) และสาย C (ปัจจุบันรวมกับบางส่วนของสาย 8 และสาย 10 แล้วเปลี่ยนชื่อเป็นสาย 14) [1.14] – [1.16]



รูปที่ 1.12 แผนที่รถไฟฟ้ามวลชนกรุงปารีส

ที่มา: <http://www.linkparis.com/paris-metro-map.htm> (2558)

รถไฟขนส่งมวลชนกรุงปารีส (Paris Metropolitan หรือ Metro de Paris) เริ่มเปิดให้บริการตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 มีจำนวนสถานี 303 สถานี เกือบทั้งหมดอยู่ใต้ดิน ดังรูปที่ 1.12 มีระยะทางให้บริการรวม 214 km ประกอบด้วยสายรถไฟจำนวน 16 สาย โดยใช้ลำดับตัวเลข 1 – 14 และ 3bis 7bis (สาย 3bis เดิมเป็นส่วนหนึ่งของสาย 3 ก่อนจะถูกแยกออกมา สาย 7bis ก็เช่นกัน เคยเป็นส่วนหนึ่งของทางแยกของสาย 7 มาก่อน) รถไฟขนส่งมวลชนกรุงปารีสเป็นระบบรถไฟขนส่งมวลชนที่มีผู้ใช้บริการ 4.21 ล้านคนต่อวัน มากเป็นอันดับสองของยุโรปรองจากกรุงมอสโก (Moscow) ประเทศ

รัสเซีย ระยะทางเฉลี่ยระหว่างสถานีของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีสมีค่าเท่ากับ 562 m แต่ละสายที่ให้บริการไม่มีการใช้ทางร่วมกัน ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟให้บริการมีค่า 20 km/h มีความเร็วสูงสุด 70 km/h ระบบจ่ายไฟฟ้าใช้รูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายผ่านรางที่ 3 (third rail) แรงดัน 750 VDC ยกเว้นสายที่ใช้ขบวนรถล้อรางจะจ่ายผ่านแท่งตัวนำ (guide bar) ขบวนรถที่ใช้มีทั้งแบบล้อเหล็ก (steel-wheel) และแบบล้อยาง (rubber-tyred) สาย 1 สาย 4 สาย 6 สาย 11 และสาย 14 ใช้ขบวนรถล้อราง และเป็นต้นแบบให้กับระบบรถไฟของเมือง Montreal ประเทศแคนาดา กรุง Santiago ประเทศชิลี และกรุง Mexico City ประเทศเม็กซิโก ขบวนรถที่ให้บริการขึ้นอยู่กับสาย อาจใช้ขบวนรถที่มีจำนวนตู้ได้ตั้งแต่ 3 – 6 ตู้ อาจจะมีได้ถึง 8 ตู้ สำหรับสาย 14 แต่ส่วนมากใช้ขบวนรถแบบ 5 ตู้ รูปที่ 1.13 แสดงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีสในปี ค.ศ. 2007



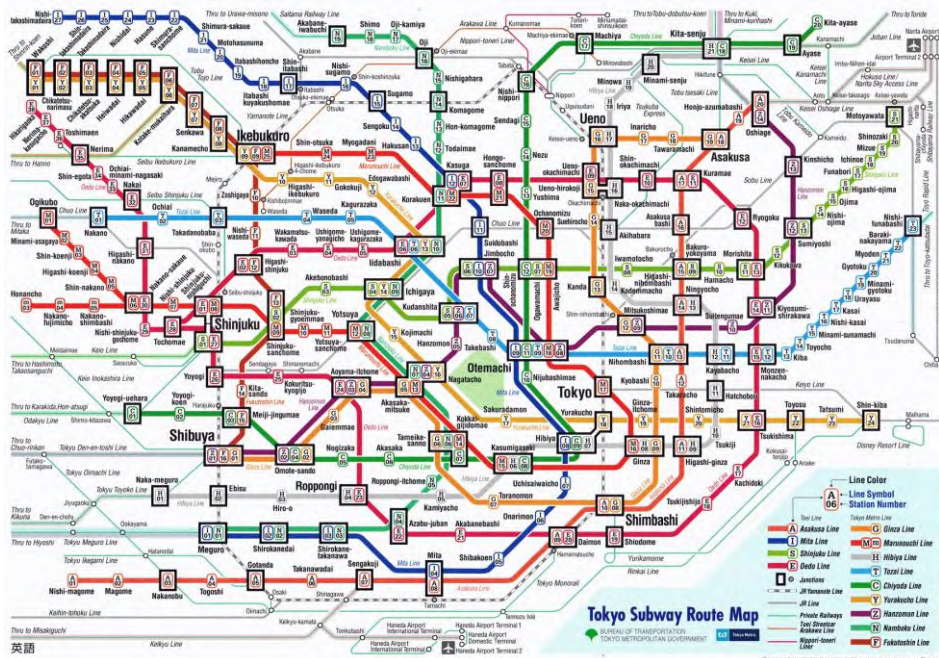
รูปที่ 1.13 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงปารีส

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Paris_Metro (2558)

1.4.3 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียว

ระบบขนส่งสาธารณะในกรุงโตเกียวมีโครงข่ายที่สลับซับซ้อนและครอบคลุมพื้นที่มากที่สุด ในแต่ละวันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงโตเกียวมีผู้ใช้บริการประมาณ

40 ล้านคนต่อวัน มีจำนวนสถานีรถไฟ 882 สถานีในเขตมหานครโตเกียว ให้บริการสายรถไฟ 121 สาย จากจำนวนผู้ให้บริการ 30 ราย และโครงข่ายรถไฟของกรุงโตเกียวกำลังขยายตัวออกไปเรื่อย ๆ สายรถไฟเกือบทั้งหมดเป็นของ Toei Subway ซึ่งบริหารโดยมหานครโตเกียว (Tokyo Metropolitan Government) และ Tokyo Metro ซึ่งดำเนินการโดยมหานครโตเกียวและรัฐบาลแห่งชาติญี่ปุ่น [1.17]



รูปที่ 1.14 แผนที่รถไฟฟ้ามหานครโตเกียว

ที่มา: Tokyo metro, Subway map, www.tokyo-metro.jp (2558)

รถไฟใต้ดินกรุงโตเกียวเปิดให้บริการครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1915 ที่ใต้สถานีโตเกียว เพื่อวัตถุประสงค์การส่งไปรษณีย์ภัณฑ์เท่านั้น รถไฟใต้ดินกรุงโตเกียวสำหรับขนส่งผู้โดยสารเริ่มเปิดใช้งานในปี ค.ศ. 1927 โดยบริษัท Tokyo Underground Railway ระยะทาง 2.2 km เชื่อมระหว่างสถานี Ueno และสถานี Asakusa เป็นส่วนของสาย Ginza ในปัจจุบัน ในปี ค.ศ. 1941 กระทรวงที่ดิน โครงสร้างพื้นฐาน และการขนส่งได้ก่อตั้ง Teito Rapid Transit Authority (TRTA) เพื่อดูแลงานรถไฟใต้ดินกรุงโตเกียวจนกระทั่ง ปี ค.ศ. 2004 บริษัท Tokyo Metro ได้เข้ามารับช่วงกิจการเดินรถไฟใต้ดินในส่วนที่อยู่ในการดูแลของ TRTA เดิม ในเขตพื้นที่กรุงโตเกียวยังมีบริษัท

Toei Subway ที่ให้บริการเดินรถไฟใต้ดินซึ่งโครงข่ายและการบริการไม่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟของ Tokyo Metro นอกจากนี้ บริษัท Japan Railway East (JR East) ได้ให้บริการรถไฟสาย Yamanote เป็นวงรอบพื้นที่กรุงโตเกียวเพิ่มเติมด้วยจำนวน 29 สถานี มีผู้ใช้บริการสาย Yamanote สูงถึง 3.68 ล้านคนต่อวัน ในขณะที่ Tokyo Metro ทั้งระบบมีจำนวนผู้โดยสารใช้บริการ 6.31 ล้านคนต่อวัน และ 2.33 ล้านคนต่อวันสำหรับระบบรถไฟของ Toei Subway รูปที่ 1.14 [1.18] แสดงแผนที่ให้บริการสายรถไฟขนส่งมวลชนกรุงโตเกียว



รูปที่ 1.15 รถไฟฟ้า JR East Yamanote Line

ที่มา: <http://www.kanriju.com/m-jbbsbqs/page/555088538b0ae.html> (2558)

ขบวนรถไฟที่ให้บริการเป็นแบบรถไฟฟาราง สายรถไฟฟ่าเกือบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นระบบ Tokyo Metro ระบบ Toei Subway หรือสาย Yamanote ของ JR East ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1500 VDC ความกว้างของรางเป็นชนิดเกจเคป (cape gauge) กว้าง 1067 mm รับไฟฟ้าผ่านแพนโทกราฟ (pantograph) [1.19] ดังแสดงในรูปที่ 1.15 ยกเว้น Tokyo Metro สาย Ginza และสาย Marunouchi ใช้ระบบ 600 VDC เป็นชนิดเกจมาตรฐาน จ่ายไฟฟ้าผ่านรางที่สาม นอกจากนี้ ในพื้นที่

กรุงโตเกียวยังมีระบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวโตเกียว (Tokyo Monorail) ที่ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 750 VDC และระบบขนส่งมวลชนอัตโนมัติ หรือ APM (automated people mover) สาย Yurikamome ที่เรียบบ่อวโตเกียว ใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 600 VAC

1.5 รถไฟฟ้าสายหลัก

ทางรถไฟสายหลัก (mainline electrification) หมายถึงระบบทางรถไฟที่เป็นเส้นทางหลักของโครงข่ายรถไฟ และเป็นเส้นทางที่มีการเชื่อมต่อไปยังทางรถไฟสาขาหรือทางรถไฟท้องถิ่นอื่น ๆ โดยปกติทางรถไฟสายหลักของประเทศจะเป็นระบบทางคู่ (double track) เป็นอย่างน้อย ความเร็วของขบวนรถไฟให้บริการจะมีความเร็วที่สูงกว่า และวิ่งเป็นระยะทางไกล (high speed and long distance) เป็นรถไฟที่ให้บริการเชื่อมระหว่างเมืองต่าง ๆ ตลอดภูมิภาค รถไฟที่ให้บริการเป็นรถไฟเชื่อมระหว่างเมือง แต่ละเมืองจะมีสถานีรถไฟซึ่งปกติจะอยู่บริเวณเขตใจกลางเมือง สำหรับมหานครขนาดใหญ่สถานีรถไฟอาจจะมีมากกว่า 1 แห่ง วางกระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ ของศูนย์กลางเมือง เช่น สถานีรถไฟที่ตั้งอยู่ทางทิศเหนือจะใช้สำหรับขบวนรถไฟระยะไกลเชื่อมกับเมืองต่าง ๆ ในภูมิภาคทางตอนเหนือของเมือง เป็นต้น การพัฒนาระบบรถไฟขนส่งมวลชนที่เหมาะสมจะมีสถานีรถไฟใต้ดินหรืออื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกันสำหรับเชื่อมต่อเพื่อเปลี่ยนรถไฟจากระบบรถไฟสายหลักของประเทศมาเป็นรถไฟขนส่งมวลชนในแต่ละเมืองทำให้การเดินทางสะดวกและรวดเร็ว

ในหัวข้อนี้ เป็นการนำเสนอระบบรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักร ประเทศเยอรมัน และประเทศญี่ปุ่นเพื่อเป็นตัวอย่างในการศึกษา ดังต่อไปนี้

1.5.1 ระบบทางรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักร

ระบบขนส่งทางรางของสหราชอาณาจักรเป็นระบบที่มีความเก่าแก่ที่สุดในโลก เริ่มตั้งแต่การให้บริการรถไฟสู่สาธารณะครั้งแรกในปี ค.ศ. 1825 จนถึงปัจจุบันทางรถไฟเกือบทั้งหมดอยู่ภายใต้การดูแลของ Network Rail ซึ่งเป็นองค์กรรัฐที่ควบคุมกิจการของ Railtrack [1.20] ในปี ค.ศ. 2002 ทางรถไฟของสหราชอาณาจักร (อังกฤษ เวลส์และสกอตแลนด์) มีระยะทางรวม 15,753 km เป็นทางรถไฟแบบเกจ

มาตรฐาน 1435 mm และเป็นระบบรางไฟฟ้า 5,268 km [1.21] ระบบทางรถไฟนี้เชื่อมต่อกับภาคพื้นทวีปยุโรปผ่านทาง Channel Tunnel ที่เปิดใช้งานในปี ค.ศ. 1994 รูปที่ 1.16 แสดงถึงเส้นทางรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักร



รูปที่ 1.16 แผนที่ทางรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักร

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Rail_transport_in_Great_Britain (2559)

เส้นทางรถไฟสายหลักของสหราชอาณาจักรแบ่งได้เป็น 4 เส้นทาง ดังรูปที่ 1.16 ประกอบด้วย 1) สาย West Coast Main Line (WCML) เริ่มต้นสายที่สถานี

London Euston ไปตามเส้นทางผ่านเมือง Rugby Birmingham Liverpool Manchester ไปจนถึง Glasgow และ Edinburgh 2) สาย East Coast Main Line (ECML) เริ่มต้นที่สถานี London King's Cross ผ่านเมือง Peterborough York Newcastle และสิ้นสุดที่ Edinburgh 3) สาย Midland Main Line (MML) เริ่มต้นที่สถานี London's St. Pancras ไปยังเมือง Leicester สิ้นสุดที่เมือง Sheffield และ 4) สาย Great Western Main Line (GWML) เริ่มต้นจากสถานี London Paddington ผ่านเมือง Swindon Bristol ไปสิ้นสุดที่เมือง Swansea

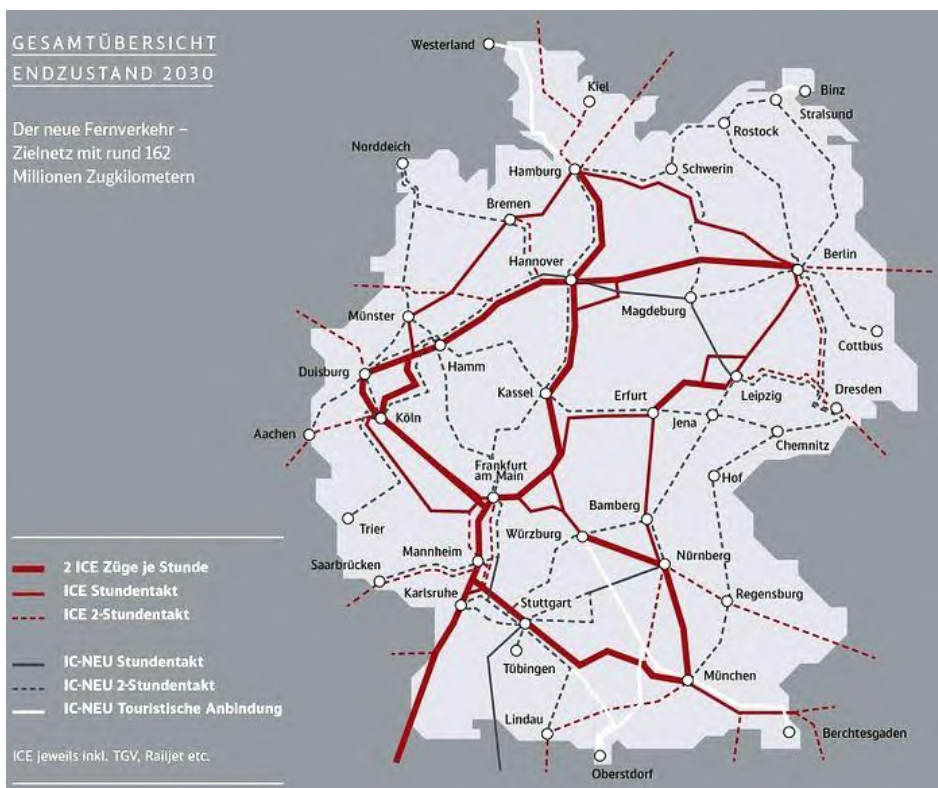


รูปที่ 1.17 รถไฟฟ้า Eurostar

ที่มา: <http://www.worldtravelblog.co.uk/> (2559)

โครงการพัฒนารถไฟความเร็วสูง (high speed rail) ของสหราชอาณาจักรได้เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดย British Rail ได้แบ่งโครงการออกเป็น 2 ส่วน คือ Advance Passenger Train (APT) โดยเน้นไปที่เทคโนโลยีรถไฟเอียง (tilting train) และรถไฟดีเซลความเร็วสูง ในปี ค.ศ. 2003 โครงการ High Speed 1 ได้เปิดใช้งานในส่วนแรก เป็นส่วนที่เชื่อมกรุงลอนดอนกับเส้นทาง Channel Tunnel ที่ Folkestone ใช้เป็นเส้นทางรถไฟระหว่างประเทศ Eurostar ดังรูปที่ 1.17 เท่านั้น ในปี ค.ศ. 2009 รัฐบาลได้เริ่มโครงการ High Speed 2 เพื่อช่วยระบายการขนส่งจาก WCML โดยจะสร้างเส้นทางรถไฟความเร็วสูงเชื่อมลอนดอนและ Midland ผ่านสนามบิน London

Heathrow และจะมีเส้นทางตัดกับสาย WCML และในปี ค.ศ. 2014 โครงการ High Speed 3 ได้ถูกนำเสนอเพื่อเชื่อมระหว่างเมือง Liverpool Sheffield Hull และ Newcastle เข้าด้วยกันผ่านสถานี Victoria ที่เมือง Manchester เส้นทางนี้จะช่วยเชื่อมเส้นทางรถไฟสาย WCML MML และ ECML ให้เชื่อมต่ถึงกัน



รูปที่ 1.18 แผนภาพทางรถไฟสายหลักที่ให้บริการรถไฟ ICE ของประเทศเยอรมัน

ที่มา: <http://www.nationalcorridors.org/> (2558)

1.5.2 ระบบทางรถไฟสายหลักของประเทศเยอรมัน

โครงข่ายทางรถไฟของประเทศเยอรมันรวมระยะทางทั้งสิ้น 41,315 km เป็นรางไฟฟ้า 19,857 km ใช้ระบบไฟฟ้า 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz เป็นทางคู่ 18,201 km ทางรถไฟส่วนใหญ่เป็นแบบเกจมาตรฐาน โดยมีบริษัท Deutsche Bahn (DB) เป็นผู้ให้บริการหลักของประเทศเยอรมัน [1.21] บริษัท DB เป็นบริษัทร่วมทุนเอกชนที่มีรัฐบาลสหพันธ์เยอรมันเป็นผู้ถือหุ้นแต่เพียงผู้เดียว เป็นบริษัทที่มีอายุประมาณ 20 ปี เท่านั้นเมื่อเทียบกับประวัติศาสตร์การพัฒนารถไฟของประเทศเยอรมัน บริษัท DB ถูก

ก่อตั้งขึ้นมาในปี ค.ศ. 1994 หลังจากเยอรมันตะวันตกและเยอรมันตะวันออกรวมชาติกันในปี ค.ศ. 1990 มีวัตถุประสงค์เพื่อควมรวมกิจการเดินรถไฟของประเทศให้เป็นหนึ่งเดียว [1.22] ในปัจจุบัน บริษัท DB เป็นบริษัทให้บริการด้านการขนส่งที่ใหญ่เป็นอันดับสองของโลก รองจาก บริษัท Deutsche Post/DHL ซึ่งเป็นบริษัทให้บริการส่งไปรษณีย์ภัณฑ์และลอจิสติกส์สัญชาติเยอรมันเช่นกัน

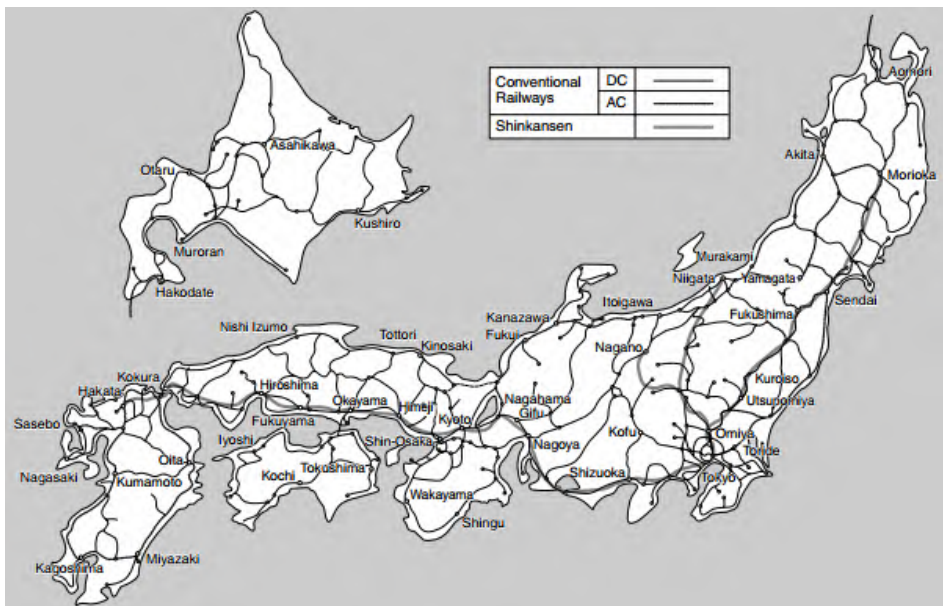


รูปที่ 1.19 รถไฟฟ้า ICE ของประเทศเยอรมัน

ที่มา: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/ICE-T_Kinding.jpg (2559)

ในปี ค.ศ. 2013 มีสถิติผู้ใช้บริการประมาณ 2.02 พันล้านคน หรือ 82.4 พันล้านคนกิโลเมตร (passenger·km) สถิติการขนส่งสินค้า 105.9 พันล้านตันกิโลเมตร (t·km) เนื่องจากลักษณะภูมิศาสตร์ของประเทศเยอรมันมีพรมแดนติดกับประเทศต่าง ๆ ถึง 9 ประเทศ ดังรูปที่ 1.18 [1.23] ทำให้การบริการเดินรถไฟในเขตประเทศเยอรมันประกอบด้วยผู้ให้บริการเดินรถไฟที่หลากหลาย มีขบวนรถไฟทั้งในประเทศและระหว่างประเทศ เช่น InterCity-Express (ICE) ดังรูปที่ 1.19 EuroCity (EC) หรือ Thalys เป็นต้น ขบวนรถไฟที่ให้บริการระหว่างประเทศนี้ต้องมีระบบรับไฟฟ้าหลายระบบในกรณีที่ต้องวิ่งให้บริการในประเทศที่ทางรถไฟสายหลักใช้ระบบ

ไฟฟ้าต่างกัน ประเทศเดนมาร์กและประเทศฝรั่งเศสใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 25 kV 50 Hz ถึงแม้ว่าทางตอนใต้ของฝรั่งเศสจะใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 3000 VDC แต่รถไฟไฟฟ้าเชื่อมจากเยอรมันไปยังฝรั่งเศสไม่ได้วิ่งในพื้นที่ดังกล่าวโดยตรง ประเทศโปแลนด์ สาธารณรัฐเชก และเบลเยียม ใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 3000 VDC ประเทศเนเธอร์แลนด์ใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 1500 VDC ประเทศลักเซมเบิร์กใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 2 ระบบ ประกอบด้วย 25 kV 50 Hz และ 3000 VDC กลุ่มสุดท้าย คือ ประเทศออสเตรียและสวิตเซอร์แลนด์ใช้ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลัก 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz เช่นเดียวกับประเทศเยอรมัน



รูปที่ 1.20 แผนภาพระบบทางรถไฟสายหลักของกลุ่ม JR

ที่มา: Y. Oura, Y. Mochinaga and H. Nagasawa, Railway electric power feeding systems, Japan

Railway & Transport Review, June 1998, pp. 48 – 58

1.5.3 ระบบทางรถไฟไฟฟ้าสายหลักของประเทศญี่ปุ่น

รถไฟไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ในประเทศญี่ปุ่นเริ่มต้นให้บริการในรูปแบบของรถรางไฟฟ้า (tram) จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 500 V ในปี ค.ศ. 1895 ที่เมืองเกียวโต โดยรัฐบาลญี่ปุ่น [1.24] เนื่องจากปัญหาแรงดันตกในระบบจ่ายไฟฟ้าทำให้ต้องเปลี่ยนระดับแรงดันทำงานมาเป็น 1200 VDC และใช้ 1500 VDC ในปี ค.ศ. 1922 โดยเริ่มจากช่วง

Yokohama ถึง Kozu ระบบไฟฟ้ากระแสตรง 1500 VDC เป็นระบบจ่ายไฟของสายรถไฟไฟฟ้าทั้งหมดของ JR ยกเว้นระบบรถไฟความเร็วสูงชินคันเซ็น (Shinkansen) เมื่อการขนส่งระบบรางของประเทศญี่ปุ่นมีความต้องการใช้งานหนาแน่นขึ้น ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1500 VDC ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน การใช้งานแรงดันสูงกระแสตรงมีข้อจำกัดทางเทคนิคและราคาแพง ทำให้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ถูกทดสอบการใช้งานในปี ค.ศ. 1957 และต่อมานำระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ระบบหม้อแปลงบูสเตอร์ (booster transformer: BT) มาใช้งานที่ระดับแรงดัน 20 kV เพื่อช่วยลดปัญหาของการแทรกสอดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดกับวงจรสื่อสารข้างเคียง ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 ระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงออโต (autotransformer: AT) ถูกนำมาใช้งานแทนที่ระบบจ่ายไฟฟ้า BT และระบบจ่ายไฟฟ้า AT นี้ถูกใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1.21 รถไฟความเร็วสูง Shinkansen (Hokuriku Shinkansen)

ที่มา: http://us.jnto.go.jp/news/news_item.php?newsid=604 (2559)

รูปที่ 1.20 แสดงระบบจ่ายไฟฟ้าของทางรถไฟสายหลักของ JR ในภูมิภาคต่าง ๆ ระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง 1500 VDC [1.25] ใช้งานในทางรถไฟสายหลักของเกาะ Shikoku และทางตอนใต้ของเกาะ Honshu (ภูมิภาค Kansai Kanto Tokai

และ Chugoku) ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ 20 kV ใช้งานทางตอนเหนือของเกาะ Honshu (ภูมิภาค Tohoku และ Tokuriku) เกาะ Hokkaido และเกาะ Kyushu สำหรับรถไฟ Shinkansen ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าแบบ AT ที่ระดับแรงดัน 25 kV ดังรูปที่ 1.21 ในขณะที่บริษัทรถไฟเอกชนอื่น ๆ ใช้ระบบรางกระแสตรง 1500 VDC

1.6 รถไฟความเร็วสูง

รถไฟความเร็วสูง (high speed train) เป็นระบบการขนส่งทางรางที่ให้บริการด้วยความเร็วสูงกว่ารถไฟปกติ โดยการใช้งานขบวนรถและระบบรางที่ถูกออกแบบเป็นพิเศษ รถไฟความเร็วสูงสายแรกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1964 ในประเทศญี่ปุ่น เรียกว่า รถไฟหัวกระสุน (bullet train) รถไฟความเร็วสูงวิ่งให้บริการบนรางแบบเกจมาตรฐานที่มีรัศมีความโค้งมากกว่าปกติ ในปัจจุบันรถไฟความเร็วสูงได้รับความสนใจอย่างสูง นอกจากภูมิภาคยุโรปแล้ว เกาหลีใต้ สหรัฐอเมริกา และจีนได้วางแผนขยายระบบรถไฟความเร็วสูงให้ครอบคลุมเส้นทางขนส่งเพื่อเชื่อมเมืองหลักที่สำคัญ จากข้อมูลล่าสุด ประเทศจีนมีทางรถไฟความเร็วสูงประมาณ 16,000 km คิดเป็น 60% ของทางรถไฟความเร็วสูงทั่วโลกที่สร้างขึ้น

รถไฟความเร็วสูงมีนิยามที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับยุคสมัยในการพัฒนาเทคโนโลยีขณะนั้น ในปี ค.ศ. 1930 รถไฟความเร็วสูงมีความเร็วสูงสุดประมาณ 130 – 160 km/h ในปี ค.ศ. 1981 ความเร็วของรถไฟความเร็วสูงเพิ่มขึ้นเป็น 350 – 400 km/h เพื่อใช้เป็นมาตรฐานของการให้บริการรถไฟความเร็วสูง สหภาพยุโรปได้กำหนดมาตรฐานไว้ใน European Union Directive 96/48/EC, Annex 1 [1.26] ดังนี้ คือรถไฟความเร็วสูงจะต้องมีความเร็วในการให้บริการไม่น้อยกว่า 250 km/h สำหรับสายที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ และไม่น้อยกว่า 200 km/h สำหรับสายที่เคยให้บริการอยู่เดิมและมีการปรับปรุงให้เป็นระบบรถไฟความเร็วสูง

เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูงเริ่มพัฒนาที่ประเทศญี่ปุ่นในปี ค.ศ. 1964 ต่อมาในทศวรรษที่ 70 ประเทศฝรั่งเศสได้ผลักดันโครงการรถไฟความเร็วสูง TGV โดยบริษัท GEC-Alsthom ปัจจุบันคือบริษัท ALSTOM รถไฟความเร็วสูง TGV ได้ทำสถิติความเร็วสูงสุดในการวิ่งทดสอบในปี ค.ศ. 2007 ไว้ที่ความเร็ว 574.8 km/h

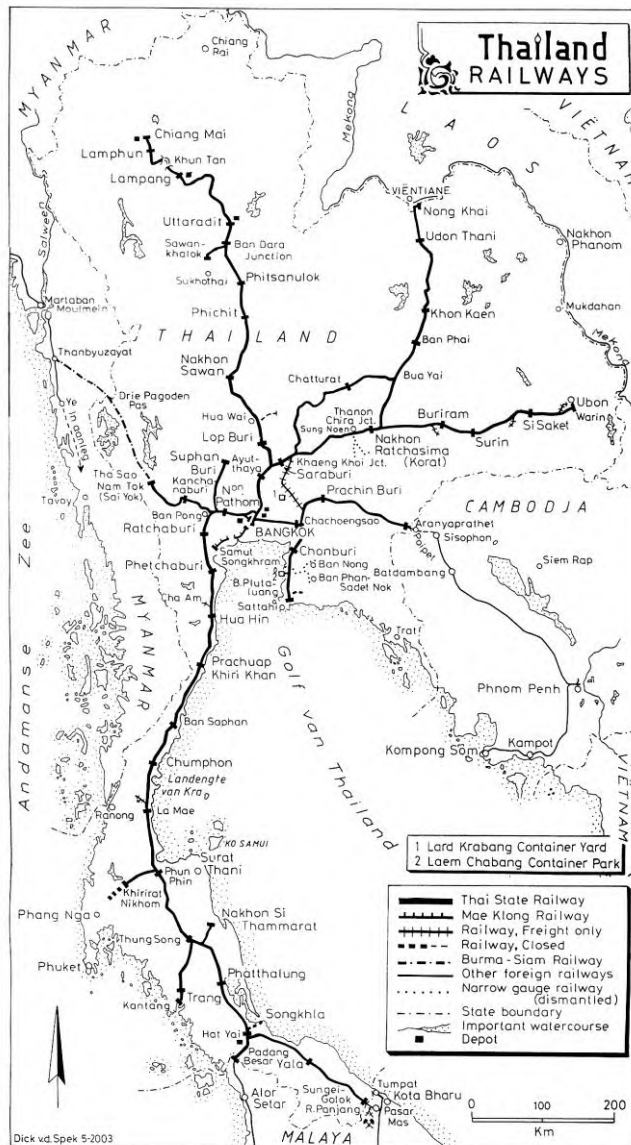
นอกจากนี้รถไฟความเร็วสูง ICE ของประเทศเยอรมัน บริษัท DB ได้เริ่มโครงการ InterCityExperimental (ICE-V) ในปี ค.ศ. 1985 ได้ทำการเริ่มต้นพัฒนารถไฟความเร็วสูง และทำสถิติโลกความเร็วสูงสุด 406.9 km/h ในปี ค.ศ. 1988 สำหรับรถไฟความเร็วสูงในทวีปยุโรปที่มีให้บริการ เช่น สเปน อิตาลี และสวีเดน เป็นต้น ในทวีปเอเชีย นอกจากประเทศญี่ปุ่นแล้ว ยังมีประเทศเกาหลีใต้ที่ใช้เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูง TGV ของ ALSTOM ได้หัวหน้าที่ใช้เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูงชินคันเซนของประเทศญี่ปุ่น และประเทศจีนที่ใช้เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูง ICE จากประเทศเยอรมันเป็นต้นแบบ ในปัจจุบันทั้งประเทศเกาหลีใต้และจีนได้พัฒนาเทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูงเป็นของตัวเองและเริ่มเข้าสู่การแข่งขันกับเทคโนโลยีจากประเทศต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.7 ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย

หากสืบย้อนกลับไป จุดเริ่มที่เกี่ยวข้องกับรถไฟของประเทศสยามย้อนไปได้ในสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 4 ในปี ค.ศ. 1855 (พ.ศ. 2398) ทรงได้รับราชบรรณาการเป็นแบบจำลองรถไฟย่อส่วนจากสมเด็จพระราชินีนาถวิกตอเรียแห่งสหราชอาณาจักร [1.4, 1.5, 1.27] สายรถไฟสายแรกของประเทศไทยเปิดให้บริการเมื่อปี ค.ศ. 1893 (พ.ศ. 2436) เชื่อมระหว่างกรุงเทพฯ และสมุทรปราการ เป็นระยะทาง 21.3 km ในปี ค.ศ. 1925 (พ.ศ. 2468) ได้เปลี่ยนระบบรถไฟสายปากน้ำมาเป็นรถรางไฟฟ้า และได้ถูกยกเลิกไปในปี ค.ศ. 1957 (พ.ศ. 2500)

กรมรถไฟหลวง (Royal State Railway of Siam: RSR) ในสังกัดของกระทรวงโยธาธิการถูกสถาปนาขึ้นในปี ค.ศ. 1890 (พ.ศ. 2433) ในสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชการที่ 5 ก่อนจะโอนกิจการมาเป็นรัฐวิสาหกิจและเปลี่ยนชื่อเป็นการรถไฟแห่งประเทศไทย (State Railway of Thailand: SRT) ในปี ค.ศ. 1951 (พ.ศ. 2494) ในปี ค.ศ. 1895 (พ.ศ. 2438) ได้เปิดใช้งานทางรถไฟเส้นทางระหว่างกรุงเทพฯ ถึงพระนครศรีอยุธยา ระยะทาง 71 km เป็นช่วงต้นของทางรถไฟสายเหนือ ถือเป็นเส้นทางสายแรกของการรถไฟแห่งประเทศไทย เส้นทางรถไฟสายเหนือนี้ในช่วงเริ่มต้นได้ใช้ทางรถไฟเกจมาตรฐาน ในขณะที่สายใต้

เลือกใช้ทางรถไฟชนิดเกาหนึ่งเมตร (meter gauge) เพื่อเชื่อมต่อกับทางรถไฟของจักรวรรดิอังกฤษในแหลมมาลายู จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1924 (พ.ศ. 2467) ได้เปลี่ยนมาใช้รางชนิดเกาหนึ่งเมตรทั่วประเทศจนถึงปัจจุบัน ดังรูปที่ 1.22 และ รูปที่ 1.23



รูปที่ 1.22 ระบบโครงข่ายทางรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย

ที่มา: <http://www.mappery.com/Thailand-Railroad-Map>

ในปัจจุบันประเทศไทยมีเส้นทางรถไฟชนิดเกวหนึ่งเมตร รวมระยะทางทั้งสิ้น 4,346 km ดังแสดงในรูปที่ 1.22 และชนิดเกวมาตรฐานรวมระยะทางทั้งสิ้น 80.55 km รางรถไฟแบบเกวมาตรฐานทั้งหมดเป็นรางไฟฟ้าและให้บริการในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลในโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ และรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ ดังรูปที่ 1.24 ยิ่งไปกว่านั้น กรุงเทพมหานครและพื้นที่จังหวัดข้างเคียงได้เริ่มดำเนินการก่อสร้างรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพิ่มเติมรวม 11 สาย ประกอบด้วย สายสีแดงอ่อน แดงเข้ม เขียวอ่อน เขียวเข้ม น้ำเงิน เหลือง เหลืองเข้ม ส้ม ม่วง เทา ชมพู ฟ้า [1.3] ดังรูปที่ 1.25



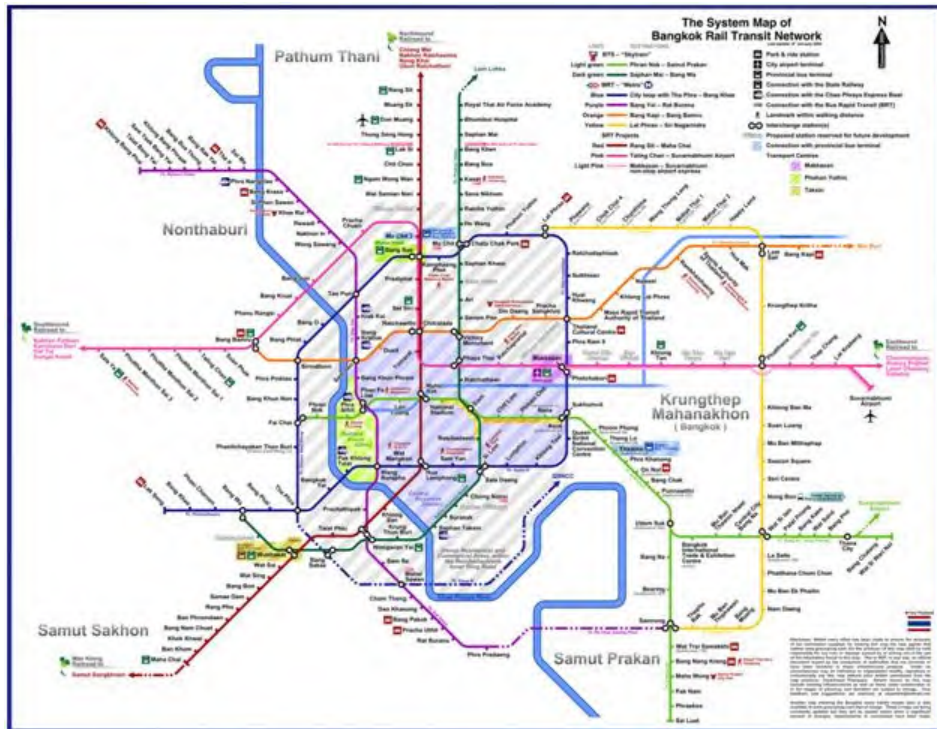
รูปที่ 1.23 รถไฟสายหลักให้บริการโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย

ที่มา: http://i994.photobucket.com/albums/af67/ALS4123_2010/IMG_7387_fix640.jpg (2559)



รูปที่ 1.24 รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์สนามบินสุวรรณภูมิ

ที่มา: http://i994.photobucket.com/albums/af67/ALS4123_2010/IMG_7387_fix640.jpg (2559)



รูปที่ 1.25 แผนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานครและจังหวัดข้างเคียง
ที่มา: www.manager.co.th (2559)

1.8 สรุป

บทนี้เป็นบทแรกที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ รายละเอียดส่วนใหญ่เล่าถึงประวัติการพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการขนส่งทางราง พัฒนาการอุตสาหกรรมรถไฟของประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปยุโรป ในรูปแบบของระบบขนส่งมวลชน ทางรถไฟสายหลัก และรถไฟความเร็วสูง นอกจากนี้ ได้กล่าวถึงประวัติย่อของการพัฒนารถไฟของประเทศไทยและแผนพัฒนาระบบขนส่งมวลชนของกรุงเทพมหานครและจังหวัดข้างเคียง

บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง

- 1.1 Railway-technology.com, Bangkok Mass Rapid Transit-Green Line Extension, Thailand.
- 1.2 BTS Skytrain System (<http://www.bts.co.th/corporate/en/02-structure01.aspx>).
- 1.3 สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและการจราจรแห่งชาติ, “แผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล พ.ศ.2553-2572”, กระทรวงคมนาคม, 16 January 2012.
- 1.4 การรถไฟแห่งประเทศไทย, “ประวัติการรถไฟแห่งประเทศไทย” (<http://www.railway.co.th/home/viewcontent.aspx?id=railway-history&lang=TH>)
- 1.5 Wikipedia, Rail transport in Thailand
- 1.6 R.S. Kirby, S. Withington, A.B. Darling and F.G. Kilgour, *Engineering in history*, **Dover**, 1990
- 1.7 SIEMENS, *1879: First electric railway*, Ref. No. sosep200729-08
- 1.8 A. Steimel, *Electric traction - motive power and energy supply*, **Oldenbourg Industrieverlag**, 2008
- 1.9 M.C. Duffy, *Electric railways 1880 – 1990*, **IET**, 2003
- 1.10 V.A. Profillidis, *Railway management and engineering*, **Ashgate**, 2012
- 1.11 M. Renner and G. Gardner, *Global competitiveness in the rail and transit industry*, **Worldwatch Institute**, 2010
- 1.12 Transport for London, London Underground, tfl.gov.uk
- 1.13 Wikipedia, London Underground
- 1.14 RATP Group, "The Network - The Metro: a Parisian institution", RATP, Retrieved 2014-01-29.

- 1.15 Classic Walks, "History of the Paris metro", classicwalks.com, Retrieved 2013-11-20.
- 1.16 Wikipedia, Paris metro
- 1.17 Wikipedia, Tokyo metro
- 1.18 Tokyo metro, Subway map, www.tokyometro.jp
- 1.19 Wikipedia, Railway electrification in Japan
- 1.20 Wikipedia, Rail transport in Great Britain
- 1.21 CIA, The World Factbook: Country Comparison :: Railways
- 1.22 Wikipedia, Rail transport in Germany
- 1.23 J. Martin, Rail Map of Germany, about.com
- 1.24 Wikipedia, Rail transport in Japan
- 1.25 Y. Oura, Y. Mochinaga and H. Nagasawa, *Railway electric power feeding systems*, **Japan Railway & Transport Review**, June 1998, pp. 48 – 58
- 1.26 European Union Directive 96/48/EC, Annex 1
- 1.27 นคร จันทสร, *ช่วงรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ*, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2555
- 1.28 Mappery, Map of Thailand railway



2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีรถไฟและระบบรางมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องแบ่งออกได้หลายยุคสมัย เริ่มตั้งแต่เทคโนโลยีเครื่องจักรไอน้ำ จนกระทั่งใช้หัวรถจักรไฟฟ้า ศาสตร์ทางด้านระบบรางนี้เป็นพหุวิทยาการ รวบรวมศาสตร์ทางวิศวกรรมหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งและลอจิสติกส์ โยธาและโครงสร้างพื้นฐาน เครื่องกลและยานยนต์ วัสดุ อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ สื่อสาร และไฟฟ้ากำลัง การศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟถึงแม้จะมุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังเป็นสำคัญ แต่พื้นฐานด้านวิศวกรรมระบบรางด้านอื่น ๆ มีความสำคัญและจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ความรู้พื้นฐานเพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานในภาพรวมของระบบรางได้ ในบทนี้ได้รวบรวมเนื้อหาในศาสตร์ด้านต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานระบบรางที่ผู้ศึกษาซึ่งส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาช่าง วิศวกร นักวิจัยหรือผู้เกี่ยวข้องกับการงานด้านไฟฟ้าควรรู้ในเบื้องต้น

2.2 ระบบทางรถไฟ

งานด้านรถไฟและระบบรางอาจจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ หลายส่วน ประกอบด้วยงานระบบทาง (track work) งานระบบขับเคลื่อน (traction) งานปฏิบัติการและบำรุงรักษา (operation and maintenance) และงานบริหารจัดการโครงการ (management) ในส่วนของงานระบบทางรถไฟมีรายละเอียดโดยสรุปดังต่อไปนี้ [2.1]

2.2.1 องค์ประกอบของทางรถไฟ

ทางรถไฟ (railway track: UK, railroad track: USA) คือ โครงสร้างที่ประกอบด้วย ราง (rail) อุปกรณ์ยึดจับ (fastener) หมอนรองราง (sleeper: UK, ties: USA) หินโรยทาง (ballast หรืออาจจะใช้แผ่นคอนกรีตอัดแรง concrete slab) สร้างอยู่บนคันทาง (subgrade) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักและเป็นทางวิ่งให้รถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.1