

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกำลังไฟฟ้า (Electrical Power) กำลังชั่วขณะ (Instantaneous power) การใช้อุปกรณ์โซลิตสแตตที่สร้างจากวงจรรวม (Integrated circuit, IC) การคำนวณเชิงเลขแบบดิจิทัล (Digital numerical method) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Embedded microcontroller) และเทคโนโลยีสมาร์ทการ์ด (Smart Card Technology)

#### 2.1 กำลังไฟฟ้า (Electrical Power)

กำลังไฟฟ้าคืออัตราการไหลของพลังงานไฟฟ้าภายในวงจรโดยหน่วยของกำลังไฟฟ้าคิดเป็นวัตต์ (Watts) หรือจูลต่อวินาที (joules per second) ดังนั้นจึงแสดงขนาดของกำลังไฟฟ้าได้ตามสมการ

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (2-1)$$

นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าสามารถหาค่าได้จากค่าเวลาเฉลี่ย (Time average) ของกำลังชั่วขณะ (Instantaneous power) ตามสมการ

$$P = \frac{1}{t} \int_0^t p(t) dt \quad (2-2)$$

ค่ายอดของแรงดัน ( $V_p$ ) และกระแส ( $I_p$ ) จะถูกแปลงเป็นค่าประสิทธิภาพ (Root mean square, RMS) ได้ตามสมการ

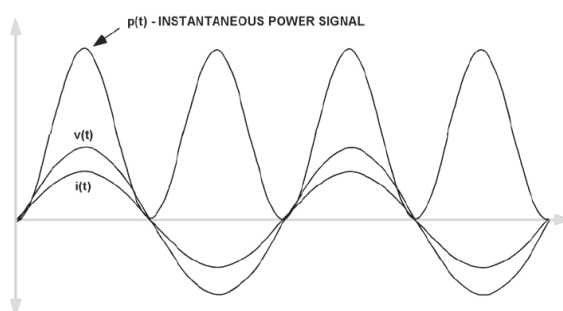
$$v(t) = \sqrt{2}V_p \sin(\omega t) \quad (2-3)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t) \quad (2-4)$$

เมื่อ  $v(t)$  คือค่าประสิทธิผล (Root mean square, RMS) ของแรงดัน ( $V_p$ )  
 $i(t)$  คือค่าประสิทธิผล (Root mean square, RMS) ของกระแส ( $I_p$ )

สัญญาณไฟฟ้าที่จะนำมาคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าจากภาพประกอบที่ 2-1 จะได้จากการชักตัวอย่างค่าแรงดันชั่วขณะ (instantaneous voltage,  $v_t$ ) และการชักตัวอย่างค่ากระแสชั่วขณะ (instantaneous current,  $i_t$ ) โดยผ่านวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter, ADC) จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่ากำลังชั่วขณะ (instantaneous power,  $p_t$ ) ตามความสัมพันธ์

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2-5)$$



ภาพประกอบที่ 2-1 กำลังชั่วขณะ (Instantaneous power)

เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าที่จะทำการวัดค่าเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์ มีความถี่ ( $\omega$ ) และมีค่ายอดของแรงดัน ( $V_p$ ) และกระแส ( $I_p$ ) ตามลำดับ ทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้ามียุทวิภาคตามหลังแรงดัน ทำให้เกิดเป็นสัญญาณกระแสเป็น  $I_p \sin(\omega t - \theta)$  จะเขียนความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในสมการ 2-5 ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} p_t &= \{V_p \sin(\omega t)\} \{I_p \sin(\omega t - \theta)\} \\ &= \frac{V_p I_p}{2} \cos \theta - V_p I_p (\cos 2\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (2-6)$$

ค่ายอดของแรงดัน ( $V_p$ ) และกระแส ( $I_p$ ) จะถูกแปลงเป็นค่าประสิทธิผล (Root mean square, RMS) ด้วยปัจจัยของค่าประกอบยอด (Crest factor) และสำหรับสัญญาณชานูชอยด์จะมีค่าประกอบยอดเป็น  $\sqrt{2}$  ดังนั้นจะเขียนสมการ 2-6 ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{V_p}{\sqrt{2}} \frac{I_p}{\sqrt{2}} \cos \theta - 2 \left( \frac{V_p}{\sqrt{2}} \frac{I_p}{\sqrt{2}} \right) \cos(2\omega t - \theta) \\ &= V_{RMS} I_{RMS} \cos \theta - 2V_{RMS} I_{RMS} \cos(2\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (2-7)$$

ถ้านำสัญญาณ  $p_i$  ในสมการ 2-7 ไปกรองด้วยวงจรรวมที่ต่ำผ่าน (Low pass filter, LPF) ที่มีความถี่ตัด (Cut-off frequency,  $f_c$ ) 50 เฮิรตซ์ ประมาณ  $2\omega - \theta$  จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$p = V_{RMS} I_{RMS} \cos \theta \quad (2-8)$$

ผลของกำลังไฟฟ้าในสมการ 2-8 จะสมนัยกับนิยามกำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะ (Instantaneous real power) สำหรับสัญญาณที่ไม่เป็นรูปชานูชอยด์ จะสามารถวิเคราะห์โดยการแปลงรูปสัญญาณแรงดันและกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) จะได้ว่า

$$v_i = V_{dc} + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^N \{V_{RMS,h} \sin(h\omega t + \alpha_h)\}$$

และ

$$i_i = I_{dc} + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^N \{I_{RMS,h} \sin(h\omega t + \beta_h)\} \quad (2-9)$$

เมื่อ	$I_{dc}, V_{dc}$	เป็นค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตามลำดับ
	$V_{RMS,h}, I_{RMS,h}$	เป็นแรงดันและกระแสประสิทธิผลของฮาร์มอนิกลำดับที่ $h$ ตามลำดับ
	$\alpha_h, \beta_h$	เป็นค่ามุมวัฏภาคแรงดันและกระแสของฮาร์มอนิกลำดับที่ $h$ ตามลำดับ

เมื่อนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแล้วผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter, BPF) จะจำแนกผลลัพธ์ของการคำนวณได้เป็น

$$p_t = \sum_{h \neq 0}^N \{V_{RMS,h} I_{RMS,h} \cos(\alpha_h - \beta_h)\} \quad (2-10)$$

ผลของกำลังไฟฟ้าในสมการ (2-10) จะสมนัยกับนิยามของกำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะ (instantaneous real power) เช่นเดียวกับสมการ (2-8)

สำหรับการคำนวณค่าพลังงานจะอาศัยความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและเวลาตามสมการ

$$E = \int p_t dt \quad (2-11)$$

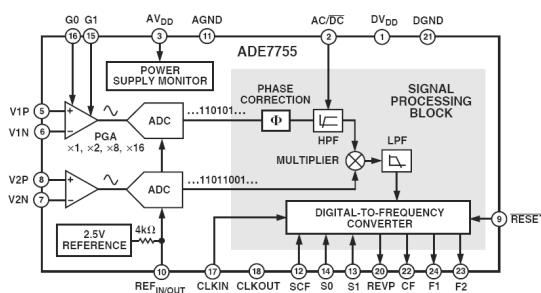
ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณด้วยวิธีการเชิงเลข จะสามารถแทนความสัมพันธ์ของสมการ (2-11) ด้วยอนุกรมคณิตศาสตร์ ตามความสัมพันธ์

$$E = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \sum_n p_{t,n} \Delta t \right) \quad (2-12)$$

เมื่อ  $p_{t,n}$  เป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะในลำดับที่  $n$   
 $\Delta t$  เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการชักตัวอย่าง

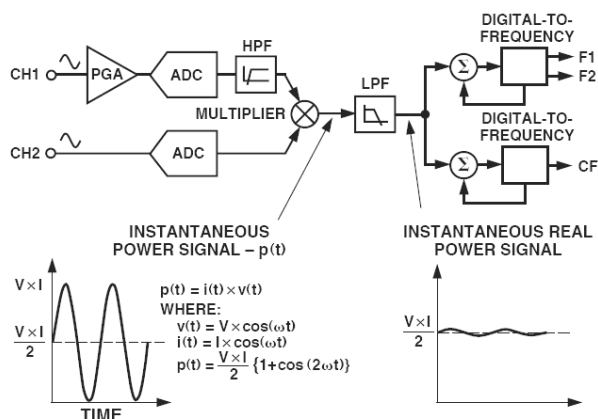
## 2.2 หลักการทำงานของเครื่องวัดแบบโพลิตสเทท

ใช้ IC ADE7755 ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าของกำลังไฟฟ้าจริงจากค่าของสัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ สำหรับแผนผังวงจร IC ADE7755 แสดงดังภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-2 แผนผังวงจร IC ADE7755

### 2.2.1 การทำงานของ IC ADE7755

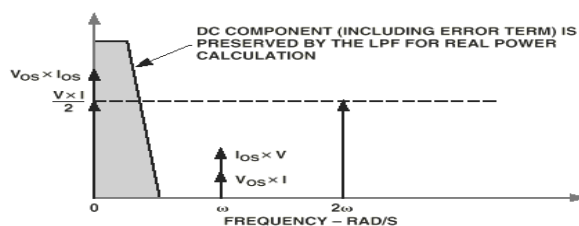


ภาพประกอบที่ 2-3 Real Power-to-Frequency Conversion

การทำงานของ IC ADE7755 ดังภาพประกอบที่ 2-3 ประกอบด้วย

- สัญญาณอนาล็อกที่ช่องสัญญาณ 1 และ 2 จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADCs) 2 ชุด
- สัญญาณกระแส และแรงดัน (Current and Voltage) จะนำมาคูณกันในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล ที่มีอัตราการซีกตัวอย่าง ที่มีค่าสูงประมาณ 900,000 ตัวอย่างต่อวินาทีแปลงค่าเป็นสัญญาณดิจิทัล 16 บิตด้วยกระบวนการซิกมา-เดลต้า
- การคูณกันจะทำให้ได้สัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ
- ทำการแยกเอาค่าสัญญาณของกำลังไฟฟ้าจริงออกจากค่าของสัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะได้โดยการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF)
- ค่าสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงจะถูกแปลงเป็นความถี่โดยวงจรแปลงค่าตรรกะเป็นความถี่ (digital-to-frequency Converter)
- หลักการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ไม่เป็นสัญญาณซายนูนขยดก็ได้เช่นเดียวกันที่ทุก ๆ ค่าตัวประกอบกำลัง
- การเชื่อมต่อ ADE7755 กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวัดพลังงาน จะใช้ค่าความถี่ด้านออกช่วงความถี่สูง

สำหรับปัญหาต่าง ๆ ที่มักพบบ่อย ๆ ในการตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้คือผลของค่าออฟเซต ซึ่งจากสมการที่ 2-13 พบว่าค่าออฟเซตจะทำการเสริมหรือหักล้างกับค่าของผลคูณที่ได้รับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 ผลของค่าออฟเซต และการกำจัด ค่าออฟเซต

โดยที่

$$p(t) = V_{os} I_{os} + V_{os} I \cos(\omega t) + I_{os} V \cos(\omega t) + \frac{VI[1 + \cos(2\omega t)]}{2} \quad (2-13)$$

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2-14)$$

$$v(t) = V_{os} + V \cos(\omega t) \quad (2-15)$$

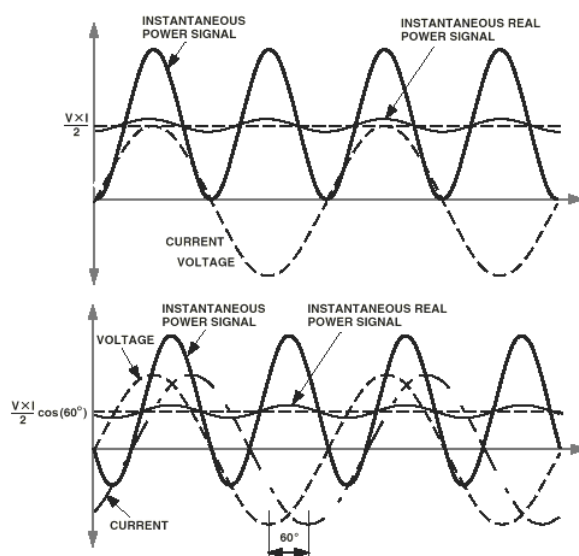
$$i(t) = I_{os} + I \cos(\omega t) \quad (2-16)$$

ผลของค่าออฟเซตสามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านทำการกำจัดค่าออฟเซตของสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งออกไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการคูณส่วนประกอบไฟตรงถูกกำจัดออกไป และนิพจน์ของ  $\cos(\omega t)$  รวมทั้งค่าฮาร์มอนิกอื่น ๆ จะถูกกำจัดออกไปโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนทำการแปลงค่าตรรกะเป็นความถี่ (digital-to-frequency Converter) สำหรับการคิดค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากค่าของสัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะโดยใช้วิธีการข้างต้นนี้ จะยังคงเป็นจริงแม้ว่ารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสจะมีวิภูภาคไม่ตรงกัน ซึ่งภาพประกอบที่ 2-4 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นในกรณีที่มุมวิภูภาคของกระแสล่าหลังมุมวิภูภาคของแรงดันอยู่  $60^\circ$  (ค่าตัวประกอบกำลัง=0.5) โดยที่สมมติให้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นสัญญาณซายนูซอยด์ ดังนั้นค่าสัญญาณของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะมีค่าเป็น

$$p(t) = V \cos(\omega t) \times I \cos(\omega t - 60^\circ) \quad (2-17)$$

$$p(t) = \frac{VI[\cos 60^\circ + \cos(2\omega t - 60^\circ)]}{2} \quad (2-18)$$

จากสมการข้างต้นและภาพประกอบที่ 2-5 แสดงว่าสามารถที่จะคิดค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากสัญญาณค่าของสัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทำการแยกส่วนประกอบไฟตรงออกมา



ภาพประกอบที่ 2-5 ผลของค่าตัวประกอบกำลัง

วิธีการนี้ยังสามารถใช้ได้กับกรณีที่รูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสที่ไม่เป็นสัญญาณรูปซายนูซอยด์ได้ด้วยซึ่งโดยปกติในทางปฏิบัติพบว่ารูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสมีค่าฮาร์โมนิกต่าง ๆ ปะปนอยู่ด้วยเสมอ จากการใช้การแปลงฟูริเยร์ของรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสจะได้ว่า

$$v_t = V_{dc} + \sqrt{2} \sum_{h=0}^N V_{RMS,h} \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2-19)$$

โดยที่

$v_t$  = ค่าแรงดันชั่วขณะ

$V_{dc}$  = ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

$V_{RMS,h}$  = ค่าประสิทธิภาพผลของแรงดันฮาร์โมนิกที่  $h$

$\alpha_h$  = ค่ามุมวิถีภาคของฮาร์โมนิกของแรงดัน

$$i_t = I_{dc} + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^N I_{RMS,h} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (2-20)$$

โดยที่

$i_t$  = ค่ากระแสชั่วขณะ

$I_{dc}$  = ค่ากระแสเฉลี่ย

$I_{RMS,h}$  = ค่าประสิทธิภาพผลของกระแสฮาร์โมนิกที่  $h$

$\beta_h$  = ค่ามุมวิถีภาคของฮาร์โมนิกของกระแส

จากสมการที่ 2-17 และ 2-18 สามารถจัดรูปของกำลังไฟฟ้าจริงให้อยู่ในนิพจน์ของฮาร์โมนิกต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P = P_1 + P_H \quad (2-21)$$

โดยที่

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2-22)$$

$$\phi_1 = \alpha_1 - \beta_1 \quad (2-23)$$

และ

$$P_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h \quad (2-24)$$

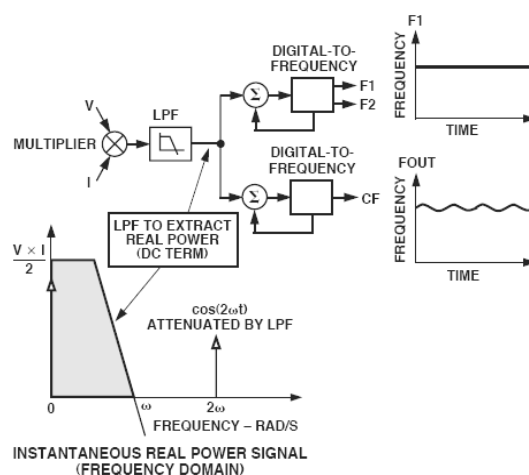
$$\phi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (2-25)$$

### 2.2.2 การทำงานวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นความถี่ของ IC ADE7755

ในส่วนของวงจรแปลงค่าตรรกะเป็นความถี่จะรับสัญญาณจากสัญญาณขาออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยสัญญาณนี้ยังมีข้อมูลของกำลังไฟฟ้าจริงอยู่ สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังส่วน



ของการแปลงค่าตรรกะเป็นความถี่ซึ่งจะทำการอินทิเกรตเพื่อผลิตความถี่ออกมา มีการกำจัดส่วนประกอบต่างๆที่ไม่ใช่สัญญาณไฟตรงต่างๆ ของสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะ โดยที่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณชานูซอซด์ จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าความถี่ที่ได้จะมีค่าเป็นอัตราส่วนกับกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยดังภาพประกอบที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 สัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นความถี่

- FOUT คือสัญญาณเอาต์พุตความถี่สูงสำหรับปรับแต่งเครื่องมือวัด ค่าความถี่ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งมีผลมาจากค่า  $\cos 2\omega t$  ในสัญญาณไฟฟ้าจริงชั่วขณะ โดยที่ค่าของ FOUT สามารถตั้งให้มีค่าได้มากถึง 32 เท่าของความถี่ของช่องสัญญาณ F1 และ F2

- F1, F2 คือสัญญาณความถี่ต่ำใช้ต่อกับอุปกรณ์นับสัญญาณได้โดยตรง

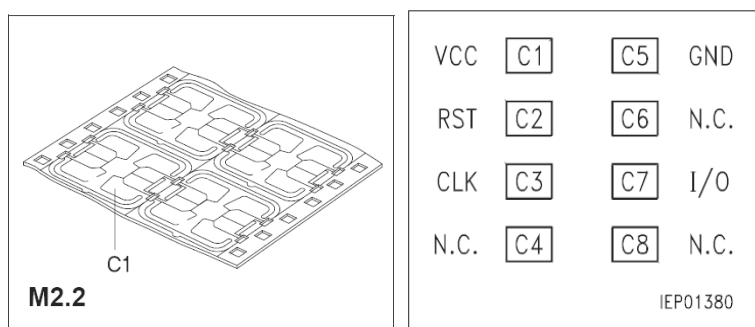
### 2.3 สมาร์ทการ์ด

สมาร์ทการ์ดคือ บัตรพลาสติกที่มีชิป IC (Intergrated circuit) ติดหรือฝังอยู่ในตัวบัตรพลาสติก ตามมาตรฐาน ISO (International Standard Organization) เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และประมวลผลภายในตัวเองโดยวิธีการเข้ารหัส ตามมาตรฐาน DES Algorithm (Data Encryption Standard) เพื่อให้ระบบมีระดับความปลอดภัยสูงขึ้น ด้วยคุณสมบัติประการหนึ่งที่ทำให้สมาร์ทการ์ดมีความแตกต่างจากบัตรพลาสติกทั่วไปก็คือขณะทำรายการ(Transaction) สมาร์ทการ์ดสามารถทำงานได้ด้วยตัวของมันเองโดยไม่ต้องอาศัยติดต่อสื่อสารกับระบบหลัก (Front End) นั่นคือสมาร์ทการ์ดไม่จำเป็นต้องมีการติดต่อสื่อสาร กับศูนย์กลางข้อมูลเหมือนกับบัตรแถบแม่เหล็ก ทำให้ประหยัดในเรื่องระบบสื่อสารไปได้มาก

### 2.3.1 ชนิดของสมาร์ทการ์ด

การแบ่งชนิดของสมาร์ทการ์ดในปัจจุบันค่อนข้างทำได้ยากเนื่องจากมีการใส่เทคโนโลยีใหม่ๆ ลงในสมาร์ทการ์ดตลอดเวลา ถ้าจะแบ่งตามชนิดของหน่วยความจำภายใน อาจไม่ชัดเจนนัก ยิ่งแบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อก็คงจะไม่ครอบคลุมสมาร์ทการ์ดทั้งหมด ดังนั้นจึงแสดงการแบ่งชนิดของสมาร์ทการ์ดได้ดังนี้

2.3.1.1 สมาร์ทการ์ดแบบมีการสัมผัส (Contact Smart Card) เป็นบัตรที่ใช้งานง่ายที่สุด ซึ่งบนบัตรมี 8 pin เพื่อใช้ในการติดต่อกับเครื่องอ่านบัตร โดย 5 pin แรก คือ Vcc, Reset, Clock (CLK), Ground (GRD) และ Input/Output (I/O) สำหรับที่เหลืออีก 3 pin (No Connect) จะเป็นส่วนที่ไว้ใช้สำรอง หน้าสัมผัสของบัตรชนิดนี้จะแสดงให้เห็นดังภาพประกอบที่ 2-7 และตำแหน่ง pin ของสมาร์ทการ์ดแสดงดังภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบที่ 2-7 หน้าสัมผัสของสมาร์ทการ์ดแบบมีการสัมผัส (Contact Smart Card)

Pin Definitions and Functions

Card Contact	Symbol	Function
C1	VCC	Supply voltage
C2	RST	Reset
C3	CLK	Clock input
C4	N.C.	Not connected
C5	GND	Ground
C6	N.C.	Not connected
C7	I/O	Bidirectional data line (open drain)
C8	N.C.	Not connected

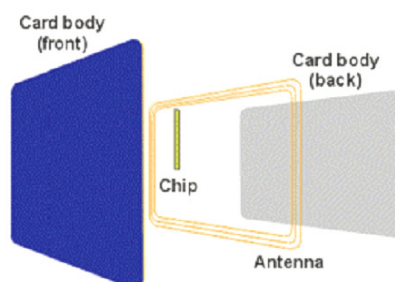
ภาพประกอบที่ 2-8 ตำแหน่ง pin ของสมาร์ทการ์ด

นอกจากนั้นสมาร์ทการ์ดแบบมีการสัมผัส (Contact Smart Card) สามารถแบ่งตามโครงสร้างภายในได้เป็น 2 ชนิดคือ

- สมาร์ทการ์ดแบบหน่วยความจำ (Memory Smart Card) หรือ Synchronous card ใช้เทคโนโลยีของ Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM) ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวพบในบัตรโทรศัพท์ ที่เป็น Memory card ชนิด token ซึ่งภายในสมาร์ทการ์ดจะมีการจัดเก็บข้อมูลแบบจำนวนนับ (Counter) การนับเลขเป็นการนับถอยหลังเพื่อเป็นการนับมูลค่าที่คงเหลือในบัตรหมายความว่าหากมีการใช้บัตรไปเรื่อยๆมูลค่าในบัตรก็จะถูกลดลงไปด้วย เมื่อมูลค่าของเงินในบัตรหมดแล้วบัตรนั้นก็จะมีค่า รวมทั้งการใช้เทคโนโลยีของ Electrically EPROM (EEPROM) ซึ่งสามารถบันทึกแก้ไขข้อมูลได้มากกว่า 1 ครั้ง

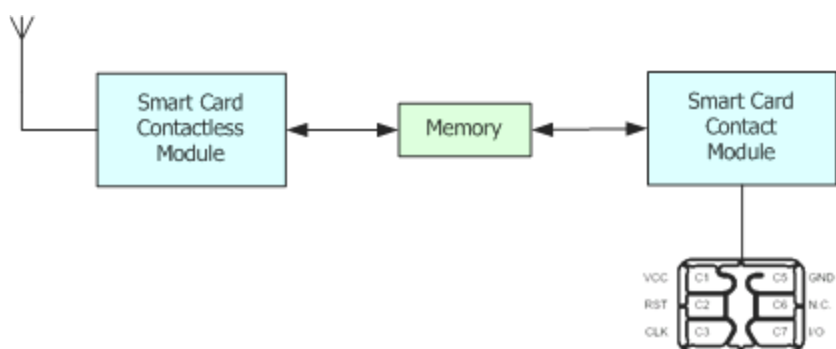
- สมาร์ทการ์ดโปรเซสเซอร์ (Processor card) สมาร์ทการ์ดประเภทนี้เป็นสมาร์ทการ์ดที่มีทั้งหน่วยความจำและหน่วยประมวลผลบรรจุอยู่ในบัตรทำให้ต้องเพิ่มหน่วยความจำสำรองเข้าไปซึ่งความสามารถในการทำงานจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและการที่จะเข้าถึงข้อมูลจะยากกว่าสมาร์ทการ์ดที่มีเฉพาะหน่วยความจำ เพราะหน่วยความจำจะอยู่ในความควบคุมของ Processor ทำให้ความปลอดภัยของสมาร์ทการ์ดชนิดนี้มีค่าสูง

2.3.1.2 สมาร์ทการ์ดแบบไม่มีการสัมผัส (Contactless smart cards) สำหรับสมาร์ทการ์ดแบบ Contactless ดังภาพประกอบที่ 2-9 จะไม่ใช้หน้าสัมผัสในการเข้าถึงข้อมูล การสื่อสารกับสมาร์ทการ์ดชนิดนี้ใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสาร โดยการส่งความถี่ 13.56 MHz ไปยังชิปสมาร์ทการ์ด ทางด้านชิปสมาร์ทการ์ดจะใช้ขดลวดเป็นเสารับ-ส่งสัญญาณ โดยเสารับ-ส่งสัญญาณจะเป็นขดลวดขนาดเล็กที่ฝังลงในเนื้อบัตร ภายนอกบัตรนี้แทบดูไม่ออกว่าเป็นบัตรสมาร์ทการ์ดด้วยเหตุนี้สมาร์ทการ์ดชนิด Contactless มักมีรูปร่างที่แปลกเสมอ จะพบว่าส่วนที่เพิ่มเข้ามาจะเป็นส่วนที่ใช้รับสัญญาณวิทยุมาแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะถูกแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าสำหรับป้อนชิป และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาให้สามารถทำงานได้ อีกส่วนหนึ่งจะถูกถอดรหัสเอาข้อมูลออกจากคลื่นวิทยุมาทำการเข้ารหัสข้อมูลและส่งกลับไปยังเสารับ-ส่งสัญญาณภายในเนื้อบัตร ดังนั้นการออกแบบสมาร์ทการ์ดแบบนี้จึงต้องออกแบบให้ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ มิฉะนั้นจะไม่เพียงพอในการทำงานของการ์ด



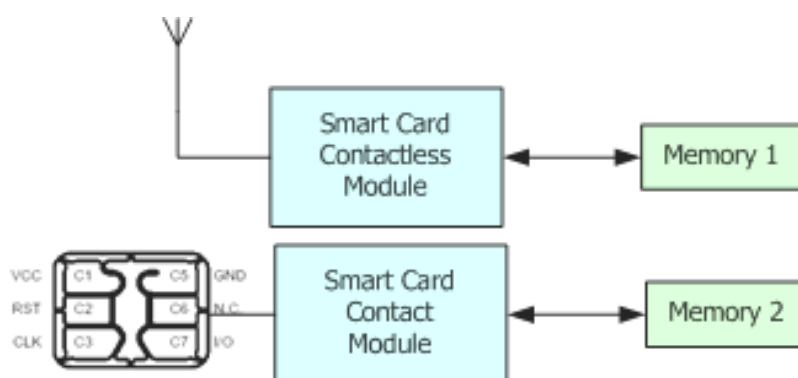
ภาพประกอบที่ 2-9 สมาร์ทการ์ดแบบไม่มีการสัมผัส (Contactless Smart Card)

2.3.1.3 สมาร์ทการ์ดแบบผสม (Com-bi Card) ดังภาพประกอบที่ 2-10 เป็นการรวมเอาสมาร์ทการ์ดแบบมีหน้าสัมผัสและไม่มีหน้าสัมผัสเข้าด้วยกัน ในการใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยสูงก็จะใช้การเข้าถึงแบบมีหน้าสัมผัส โดยผ่านตัวโปรเซสเซอร์ ส่วนงานที่ต้องการความรวดเร็วสะดวกสบายก็จะใช้การสื่อสารทางคลื่นวิทยุโดยไม่มีการใช้หน้าสัมผัส



ภาพประกอบที่ 2-10 โครงสร้างภายในของสมาร์ทการ์ดชนิด Com - Bi Card

2.3.1.4 Hybrid Card ดังภาพประกอบที่ 2-11 มีลักษณะโครงสร้างเหมือนสมาร์ทการ์ดประเภท Com - Bi Card แต่จะแตกต่างกันที่หน่วยความจำข้อมูล โดยหน่วยความจำระหว่างมีหน้าสัมผัสและไม่มีหน้าสัมผัสจะถูกแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิง เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ในปัจจุบัน Hybrid Card จะมีความหมายรวมถึงบัตรที่มีคุณสมบัติในการใช้งานตั้งแต่สองอย่างขึ้นไปเช่น การ์ดที่มีทั้งแถบแม่เหล็กและชิปสมาร์ทการ์ด บัตรสมาร์ทการ์ดที่มีหน้าสัมผัสและไม่มีหน้าสัมผัส

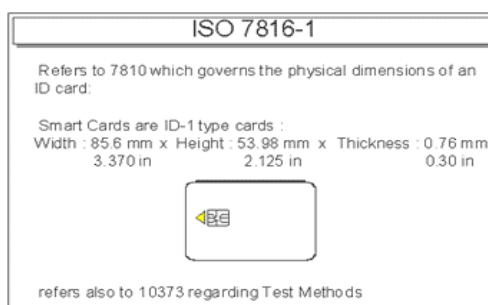


ภาพประกอบที่ 2-11 โครงสร้างภายในของสมาร์ทการ์ดชนิด Hybrid Card

## 2.3.2 มาตรฐานของสมาร์ทการ์ด

2.3.2.1 มาตรฐาน ISO7816 เป็นการกำหนดในเรื่องคุณลักษณะของบัตรที่นำมาทำสมาร์ทการ์ด โดยแบ่งได้เป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

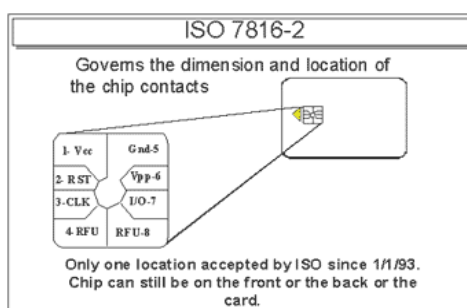
2.3.2.1.1 ISO 7816-1 ดังภาพประกอบที่ 2-12 เป็นมาตรฐานที่กำหนดด้วยเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของสมาร์ทการ์ด



ภาพประกอบที่ 2-12 ขนาดและรูปร่างของบัตรสมาร์ทการ์ด

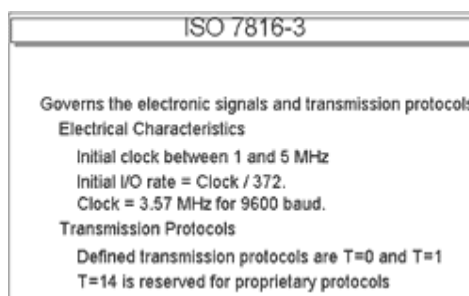
2.3.2.1.2 ISO 7816-2 เป็นมาตรฐานที่กำหนดขนาดหน้าสัมผัส และตำแหน่งชิพสมาร์ทการ์ดบนบัตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-13 ซึ่งประกอบด้วย

- ขนาดของหน้าสัมผัสของชิพสมาร์ทการ์ด
- ตำแหน่งของหน้าสัมผัสบนบัตร



ภาพประกอบที่ 2-13 ตำแหน่งหน้าสัมผัสของสมาร์ทการ์ด

2.3.2.1.3 ISO 7816-3 เป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และโปรโตคอล (Protocol) ที่ใช้ในการสื่อสารกับชิพสมาร์ทการ์ด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-14



### ภาพประกอบที่ 2-14 สัญญาณนาฬิกาและรูปแบบการส่งสัญญาณ

2.3.2.1.4 ISO 7816-4 เป็นมาตรฐานที่กำหนดรายละเอียดในเรื่องของชุดคำสั่งของสมาร์ทการ์ดที่ต้องเหมือนกัน (Application Protocol Data Unit (APDU)) รวมไปถึงรูปแบบการเข้ารหัสข้อมูล

2.3.2.1.5 ISO 7816-5 เป็นมาตรฐานที่กำหนดรายละเอียดในเรื่องของไฟล์ในสมาร์ทการ์ด และระบบและการลงทะเบียนหมายเลขสำหรับการค้นหาแอปพลิเคชัน (AID) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลแบบ byte โดยที่ 5 ไบต์แรกระบุถึงผู้สร้างแอปพลิเคชัน และ 11 ไบต์หลังระบุชนิดของแอปพลิเคชัน

2.3.2.1.6 ISO 7816-6 เป็นข้อมูล Interindustry ซึ่ง data elements ซึ่งอธิบายถึงรูปแบบการสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ รูปแบบค่า answer to reset (ATR) และรูปแบบโปรโตคอลการส่งข้อมูล (T=0, T=1)

### 2.3.3 เครื่องอ่านสมาร์ทการ์ด (Smart Card Reader)

ส่วนสำคัญที่ใช้เชื่อมต่อกับสมาร์ทการ์ดก็คือ สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับหน้าสัมผัสของชิปสมาร์ทการ์ดโดยตรงทำให้สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์เป็นชิ้นส่วนที่มีราคาสูงที่สุดในบรรดาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับสมาร์ทการ์ดทั้งหมดเพราะส่วนที่เป็นขาลโลหะที่ใช้ในการกดลงกับหน้าสัมผัสชิปต้องผลิตด้วยโลหะที่คุณสมบัติที่ทนทาน แต่ต้องไม่ทำอันตรายต่อหน้าสัมผัสชิปสมาร์ทการ์ดและต้องมีขนาดตรงตามมาตรฐาน ISO07816-2 ทำให้ต้องใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากมากกว่าปกติ สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ที่ใช้กันอยู่มี 2 ชนิดตามชนิดของการเชื่อมต่อของสมาร์ทการ์ดดังนี้

#### 2.3.3.1 สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิดหน้าสัมผัส

สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิดหน้าสัมผัสเป็นสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างพร้อมๆกับสมาร์ทการ์ดถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรก โดยมีส่วนประกอบของโครงหลักของสมาร์ทการ์ด

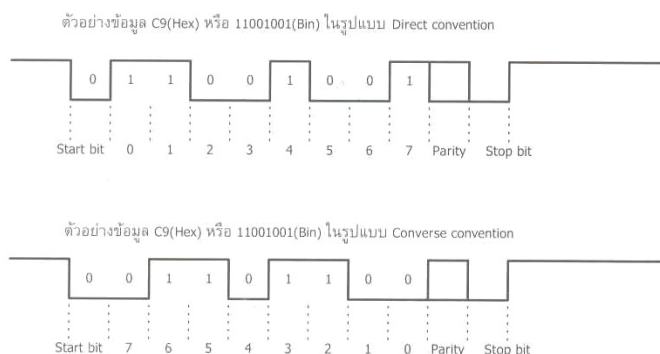
รีดเดอร์ ขาสัมผัส และสวิตช์ตรวจสอบบัตร ซึ่งโครงหลักของสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์เป็นแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปสำหรับเป็นช่องทางให้สมาร์ทการ์ดสอดเข้ามา โดยส่วนในสุดของช่องจะติดตั้งสวิตช์ตรวจสอบบัตร เมื่อบัตรถูกสอดเข้ามาจนสุด ตัวบัตรจะไปกดสวิตช์ตรวจสอบบัตร ทำให้สวิตช์ ON ทำให้เทอร์มินอลทราบได้ว่ามีบัตรสอดเข้ามา นอกจากนี้โครงสร้างหลักของสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์จะมีการเจาะช่องสำหรับติดตั้งขาสัมผัสในตำแหน่งที่ตรงกับหน้าสัมผัสของสมาร์ทการ์ด

### 2.3.3.2 สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิด Contactless

สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิด Contactless จะแตกต่างจากชนิดหน้าสัมผัส เนื่องจากสมาร์ทการ์ดชนิด Contactless ใช้คลื่นวิทยุความถี่ 13.56 MHz ทำให้ส่วนที่เป็นขาสัมผัสต้องเปลี่ยนเป็นวงจรรับส่งและสายส่งคลื่นวิทยุ ซึ่งมีหลักการคล้ายกับเครื่องรับส่งคลื่นวิทยุ ซึ่งคลื่นที่รับส่งนั้นจะมีความแรงคลื่นไม่สูงนัก ทำให้ระยะการรับส่งข้อมูลลดลง โดยปกติแล้วจะอยู่ในระยะเพียง 3 ถึง 10 เซนติเมตรเท่านั้น (ความผิดพลาดของข้อมูลน้อยกว่าร้อยละ 1) แต่ก็มีสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิด Contactless บางรุ่นสามารถทำระยะได้สูงถึง 1-10 เมตร ทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลมากกว่าร้อยละ 10 ซึ่งเกินกว่าจะยอมรับได้ในงานบางอย่าง สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิด Contactless ส่วนใหญ่จะเป็นชุดสำเร็จรูปจากผู้ผลิตโดยตรง ซึ่งจะรวมเอาเสารับส่งสัญญาณ วงจรภาครับส่ง และชุดคอนโทรลเลอร์เข้าด้วยกัน โดยผู้ที่ต้องการนำไปใช้งานจะสามารถควบคุมและรับส่งข้อมูลโดยเชื่อมต่อผ่านพอร์ตสื่อสารของสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์โดยตรง อีกทั้งเทคโนโลยีเกี่ยวกับสมาร์ทการ์ดชนิด Contactless ยังถูกผู้ผลิตสมาร์ทการ์ดจำกัดไม่ให้นำไปเผยแพร่ จึงทำให้ไม่ค่อยพบเห็นอุปกรณ์ของสมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ชนิด Contactless ขายแยกเป็นส่วนๆ

### 2.3.4 การเชื่อมต่อชิปสมาร์ทการ์ด

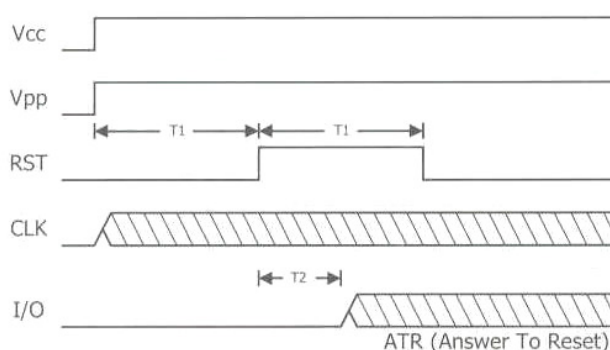
#### 2.3.4.1 การสื่อสารกับชิปสมาร์ทการ์ดในระดับสัญญาณไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 2-15 การสื่อสารกับชิปสมาร์ทการ์ดในระดับสัญญาณไฟฟ้า

- การสื่อสารกับชิปสมาร์ทการ์ดในระดับสัญญาณไฟฟ้าตามภาพประกอบที่ 2-15 ใช้มาตรฐาน ISO7816-3 เป็นตัวกำหนดการสื่อสาร
- ใช้ระดับสัญญาณระดับ 0-3 โวลต์
- ในการสื่อสารจะใช้แบบซิงเกิลบัส และต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการรับ-ส่งข้อมูลแต่ละบิต

#### 2.3.4.2 การรีเซตชิปสมาร์ทการ์ด (Card Present)

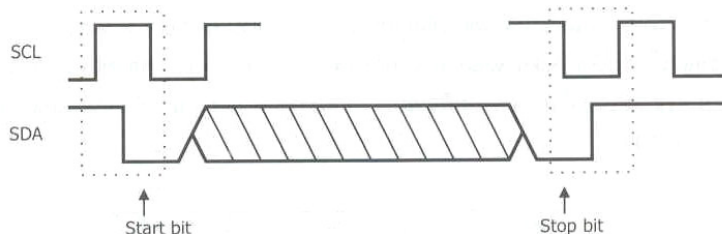


ภาพประกอบที่ 2-16 การรีเซตชิปสมาร์ทการ์ด (Card Present)

- การรีเซตชิปสมาร์ทการ์ดดังภาพประกอบที่ 2-16 ถ้า Vcc ลดต่ำลงจะต้อง Open circuit หรือ Float วงจรทันที
- สัญญาณรีเซตจะต้องเป็นลอจิก 0 ระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 400-40,000 ไซเคิลสัญญาณนาฬิกา (T1)
- เปลี่ยนเป็นลอจิก 1 ที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณเมื่อชิปรีเซตตัวเองเรียบร้อยแล้ว จะทำการส่งข้อมูล ATR (Answer to Reset) เพื่อบอกชนิดโปรโตคอล
- อัตราการส่งข้อมูล ATR จะใช้อัตราส่วน CLK/372 (Asynchronous) หรือ 9600 บิตต่อวินาที (Synchronous)
- สัญญาณนาฬิกาจะป้อนให้ด้วยความถี่ 3.5712 เมกะเฮิร์ตซ์ต่อเนื่องกัน (Continuous Clock)



### 2.3.4.3 โปรโตคอล I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated circuit)



ภาพประกอบที่ 2-17 โปรโตคอล I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated circuit)

- โปรโตคอล I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated circuit) ดังภาพประกอบที่ 2-17 จะใช้งานกับ  
สมาร์ทการ์ดชนิด Memory

- มีการส่งสัญญาณในการเชื่อมต่อเพียง 2 สัญญาณคือสัญญาณข้อมูล (SDA) และสัญญาณนาฬิกา (SCL)

- ทำการส่งบิตเริ่มต้นส่งข้อมูล (Start bit) ที่ขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกาส่วนบิตสิ้นสุด (Stop bit) จะทำที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา

### 2.3.5 บัตรสมาร์ทการ์ด SLE 4442

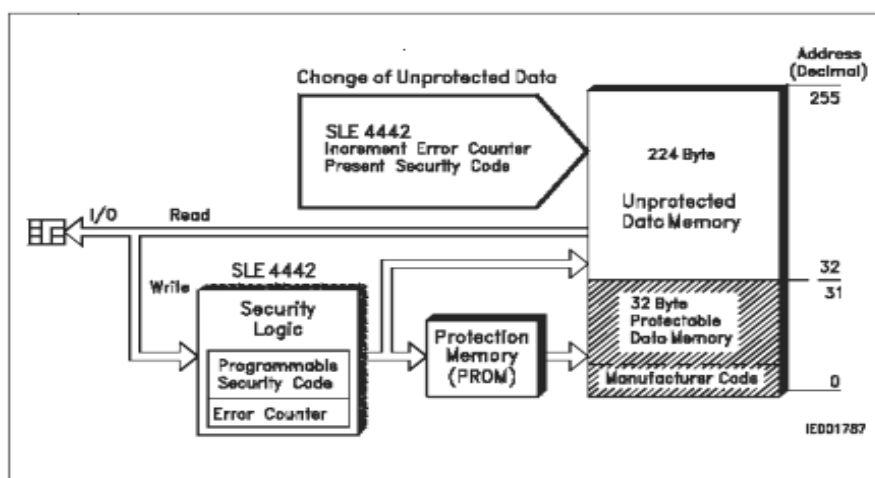
บัตรสมาร์ทการ์ด SLE 4442 เป็นบัตรสมาร์ทการ์ดแบบมีการสัมผัสชนิด memory card โดยในการใช้งานจำเป็นต้องมีการสอดบัตรเข้าไปในเครื่องอ่านสมาร์ทการ์ด (smart card reader) เพื่อให้หน้าสัมผัส สัมผัสกับเครื่องอ่าน สมาร์ทการ์ดประเภทนี้จะมีการฉีกขีปทองขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณครึ่งนิ้วเอาไว้ที่ด้านหน้าบัตรดังภาพประกอบที่ 2-18



ภาพประกอบที่ 2-18 บัตร SLE 4442

2.3.5.1 คุณลักษณะทั่วไปของบัตรสมาร์ทการ์ด SLE 4442 แสดงตามภาพประกอบที่ 2-19 ประกอบด้วย

- หน่วยความจำแบบ EEprom ขนาด 256 Byte โดยแบ่งเป็น Protectable Data Memory 32 Bytes และ Unprotected Data Memory 224 Bytes
- สามารถอ่านและเขียนได้ถึง 100,000 ครั้ง เก็บข้อมูลได้ 10 ปี
- ส่วนที่เป็น Protectable Data Memory จำนวน 32 Byte สามารถเขียนข้อมูลถาวรไว้ได้ โดยจะลบหรือแก้ไขเปลี่ยนแปลงไม่ได้อีกเลยและ ในส่วนนี้ ได้ถูกเขียนข้อมูลถาวรไว้แล้ว 12 Byte ตามมาตรฐาน ISO7816
- มีระบบตรวจสอบ PSC Code (Programmable Security Code) ด้วยรหัสขนาด 3 Byte โดยจะต้องทำการ Verify PSC ก่อนเสมอหลังจาก จ่ายไฟเข้า ก่อนที่จะทำการเขียนข้อมูลลงใน บัตร
- มีระบบ Error Counter กรณีที่ Verify PSC ไม่ถูกต้องถึง 3 ครั้ง บัตรจะไม่สามารถเขียนข้อมูลได้อีกเลย เพื่อป้องกันการ Copy หรือ การทำบัตรเลียนแบบ (การนับ Error Counter จะถูก Reset เมื่อได้ ทำการ Verify PSC ได้ถูกต้อง)
- PSC Code มาตรฐานของบัตรใหม่ที่ผลิตจากโรงงานคือ FFFFFFF



ภาพประกอบที่ 2-19 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของ SLE4442

### 2.3.5.2 ชุดคำสั่งควบคุม SLE 4442

- คำสั่ง Status คำสั่งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการตรวจสอบว่ามีบัตรเสียบอยู่ที่ สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์หรือไม่ หากมีบัตรเสียบอยู่จะส่งข้อมูลแสดง Manufacturer Code ขนาด 4 Bytes ออกมา

- คำสั่ง Read Data เป็นคำสั่งที่ใช้ในการอ่านข้อมูลของบัตร์ออกมาแสดงเป็นจำนวน 16 Bytes โดยต้องมีการกำหนดตำแหน่ง Address เริ่มต้นเป็นเลขฐานสิบหก หากไม่ได้เขียนบัตร์ที่ สมาร์ทการ์ดรีดเดอร์ หรือไมซ์บัตร์ SLE4442 จะไม่สามารถอ่านข้อมูลออกมาได้
- คำสั่ง Write Data คำสั่งนี้ใช้ในการเขียนข้อมูลลงในบัตร์สมาร์ตการ์ด สามารถเขียนข้อมูลความยาวสูงสุดได้ครั้งละ 16 Bytes เริ่มเขียนข้อมูลที่ตำแหน่ง Address เริ่มต้น ที่ได้กำหนดไว้จนถึงตำแหน่ง Address ของข้อมูล Byte สุดท้าย สำหรับคำสั่งนี้เป็นการเขียนแบบไม่ถาวรสามารถลบหรือแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้
- คำสั่ง Read Protection Memory คำสั่งนี้เป็นการอ่านค่า Bit Organization ของส่วน Protection Memory ทั้ง 32 Bits โดยเรียงจาก 0-31 โดยแต่ละบิตจะแสดงค่าตำแหน่ง Address ของส่วน Protection Memory (00H – 20H) ตำแหน่งใดที่ยังสามารถเขียนข้อมูลลงไปได้ และตำแหน่งใดได้มีการเขียนข้อมูลถาวรไว้แล้ว
- คำสั่ง Write Protection Memory คำสั่งนี้จะคล้ายกับคำสั่ง Write Data ต่างกันตรงที่เมื่อใช้คำสั่งนี้ จะเป็นการเขียนข้อมูลถาวรลงในส่วน Protection Memory โดย BBH จะเป็นตำแหน่ง Address เริ่มต้นที่จะเขียนข้อมูลลงไป และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขใดๆ ได้อีกเลย
- คำสั่ง Verify PSC คำสั่งนี้ใช้ในการตรวจสอบ Verify ค่า PSC (Programmable Security Code) ซึ่งเป็นรหัสขนาด 3 Bytes โดยจะต้องทำการตรวจสอบ Verify ค่า PSC ก่อนเสมอหลังจากที่จ่ายไฟเข้า เพื่อที่จะสามารถเขียนข้อมูลลงไปในบัตร์ได้ หาก Verify ค่า PSC ได้ตรงกันกับค่าในบัตร์ การตรวจสอบ Verify ค่า PSC สามารถทำได้ 3 ครั้ง ถ้าตรวจสอบ Verify ค่า PSC ไม่ถูกต้องจนถึงครั้งที่ 3 บัตร์นี้จะไม่สามารถเขียนข้อมูลใดๆ ลงไปได้อีก บัตร์ใหม่ที่ผลิตจากโรงงานนั้นค่า PSC Code คือ FFFFFFF การ Verify หลังจากจ่ายไฟเข้าบัตร์นี้ถ้าถูกต้องจะมีผลตลอดไปจนกว่าจะดึงบัตร์ออก ถึงแม้ว่าจะส่งคำสั่งไป Verify ค่า PSC ที่ไม่ถูกต้องอีกครั้งก็จะมีผลใดๆ ทั้งสิ้นเพราะถือว่าได้ทำการ Verify ค่า PSC ถูกต้องตรงกันกับค่าในบัตร์ไปแล้ว

## 2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 ของบริษัท Microchip เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถ และเพียงพอไปด้วยทรัพยากรมากมาย ทำให้ทำงานได้หลายๆ อย่าง สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 จะมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
- คำสั่งหนึ่งๆ ใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
- มีความถี่ใช้งานได้สูงสุดที่ 20MHz (PIC16F877-20/P)

- ทำงานแบบ Pipe-line (มี 2 ท่อ) ทำให้ ณ เวลาหนึ่งทำงาน 2 อย่างพร้อมๆกัน ได้
- หน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 8K Word (1 word=14 บิต)
- มี RAM ขนาด 368 ไบต์ ให้เราใช้งาน
- มี EEPROM ขนาด 256 ไบต์
- มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 8 ระดับ
- มีระบบ Power on Reset, Power Up Timer, Oscillator Start-up timer
- Watchdog timer
- มีระบบ Code Protection ป้องกันการคัดลอก
- มีโหมดประหยัดพลังงาน
- สัญญาณนาฬิกา มีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน คือ อาจจะใช้ XTAL หรือ วงจร RC ก็ได้
- สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5VDC ได้
- ใช้การโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming
- ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2VDC ถึง 5.5VDC
- Current Sink และ Current Source อยู่ที่ 25 mA
- มี Timer/Counter 3 ตัว
- มีโมดูล Capture/Compare/PWM อีก 2 ชุด (มี PWM ทำให้สะดวกในการนำไปควบคุม

#### DC Motor)

- มี A-TO-D Converter แบบ 10 บิต จำนวน 8 ช่องนำเข้าไปในตัว
- มีระบบ USART สำหรับต่อกับ การสื่อสารแบบ RS232 หรือดีกว่า
- มีระบบตรวจระดับไฟเลี้ยง (Brown-out reset)
- มี I/O พอร์ตทั้งหมด 5 พอร์ต