

บทที่ 2

ฟ้าผ่าและปรากฏการณ์หลังจากการเกิดฟ้าผ่า

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่าที่ขอมรับกัน เช่น ฟ้าผ่าลง ฟ้าผ่าขึ้น รวมทั้งฟ้าผ่าต่อเนื่องหรือฟ้าผ่าซ้ำ และปรากฏการณ์ที่สำคัญๆหลังจากการเกิดฟ้าผ่า ซึ่งจะกล่าวถึงแต่เพียงผลทางไฟฟ้าเท่านั้น ในตอนท้ายจะได้กล่าวถึงการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสฟ้าผ่าโดยใช้สายอากาศ ซึ่งจะใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบเครื่องนับฟ้าผ่าที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

2.1 การเกิดฟ้าผ่า

คำอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดฟ้าผ่าที่เป็นที่ขอมรับ (Berger, 1977 :119-190 ; Schonland, 1954 : 576-580 ; Wagner and Hileman, 1958, 1961 ; Uman, 1984 :1-12) คือ ฟ้าผ่าเกิดจากการสะสมของประจุไฟฟ้าภายในก้อนเมฆเนื่องจากการเสียดสีของอากาศกับละอองน้ำในก้อนเมฆ ทำให้ละอองน้ำส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบ และอากาศมีประจุเป็นบวก เพราะสูญเสียดิอิเล็กตรอนให้กับละอองน้ำ กระแสลมจะพัดพาอากาศที่มีประจุบวกขึ้นสู่ด้านบนของก้อนเมฆ ทำให้บริเวณส่วนบนของก้อนเมฆมีการสะสมของประจุบวก ส่วนละอองน้ำซึ่งหนักกว่าอากาศจะอยู่ที่ด้านล่างของก้อนเมฆ ทำให้ส่วนล่างของก้อนเมฆมีประจุลบ เมื่อประจุไฟฟ้าที่สะสมในก้อนเมฆมีมากขึ้น (ประจุไฟฟ้าเหล่านั้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขั้วตรงข้ามที่พื้นโลกด้วย ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นโลกมีค่าสูงขึ้น สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นนี้สามารถใช้เป็นระบบเตือนภัยฟ้าผ่า (Pierce, 1977 : 497-520) ที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน) จนกระทั่งความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณใต้ก้อนเมฆสูงถึงค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของอากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 10 kV/m ที่สถานะความดันบรรยากาศต่ำ (สำหรับ 55° ละติจูด, 2528 : 355) จะเกิดการดีสชาร์จซึ่งมีลักษณะเป็นช่วงก้าว (Step) ประจุที่อยู่ส่วนหัวของดีสชาร์จที่กำลังกรูยทางอย่างสุ่มๆนี้เรียกว่าหัวนำร่องหรือลีดเดอร์ (Leader) การเคลื่อนที่ของดีสชาร์จจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากอากาศจะเกิดไอออไนเซชันได้ง่ายในแนวทางนี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลีดเดอร์มีลักษณะสุ่มดังที่ได้อธิบายข้างต้น ดังนั้นลีดเดอร์จึงอาจวิ่งจากก้อนเมฆหนึ่งไปสู่อีกก้อนเมฆหนึ่ง (Cloud to Cloud) หรืออาจวิ่งจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก (Cloud to Ground) ก็ได้

ในกรณีที่ลีดเดอร์เคลื่อนที่เป็นช่วงก้าวจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก ก้าวสุดท้ายของลีดเดอร์จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากที่พื้นโลก ทำให้เกิดสตรีมเมอร์วิ่งขึ้นจากพื้นโลกเข้าหาลีดเดอร์ เมื่อลีดเดอร์และสตรีมเมอร์เคลื่อนที่มาบรรจบกัน จะทำให้เกิดการเชื่อมถึงกันระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก ประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆจะดีสชาร์จผ่านเส้นทางที่ลีดเดอร์ได้กรูยทางไว้โดยใช้เวลา

เป็นสิบถึงหลายร้อยไมโครวินาที (10-100 μ s) ถ้าประจุที่สะสมจะลงสู่พื้นโลกตามเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกนี้เรียกว่า ลำฟ้าผ่า (Main Stroke) และกระแสจำนวนมากที่ไหลผ่านตามเส้นทางนี้เรียกว่ากระแสฟ้าผ่า (Lightning Current)

การเกิดฟ้าผ่าบางครั้งจะมีการคายประจุจากก้อนเมฆหลายครั้งในลำฟ้าผ่าเดียวกัน เนื่องจากแกนกลางของลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นครั้งแรกยังเป็นตัวนำอยู่ ในกรณีนี้เราจะเรียกฟ้าผ่าชนิดนี้ว่าฟ้าผ่าซ้ำ (Multistroke) ฟ้าผ่าซ้ำจะมีความรุนแรงมากกว่าฟ้าผ่าเดี่ยว เพราะในฟ้าผ่าซ้ำมีการคายประจุจำนวนมากหลายครั้งในช่วงระยะเวลาอันสั้น (≤ 1 วินาที) ในขณะที่ประจุไฟฟ้าในฟ้าผ่าเดี่ยวมีน้อยกว่า เพราะมีการคายประจุครั้งเดียว นอกจากนั้น กระแสฟ้าผ่าติดตามที่เกิดในลำฟ้าผ่าต่อมามีความชัน (Steepness) ที่สูงกว่าฟ้าผ่าในครั้งแรก (เนื่องจากลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นครั้งแรกยังมีลักษณะเป็นตัวนำอยู่)

การเกิดฟ้าผ่าพื้นโลกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ โดยสามารถอธิบายได้จากทิศทางการเคลื่อนที่ของลีดเดอร์และประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆดังนี้ คือ ลีดเดอร์เคลื่อนที่จากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินและมีการถ่ายเทประจุลบจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน (ฟ้าผ่าลง ขั้วลบ) ลีดเดอร์เคลื่อนที่จากพื้นดินขึ้นสู่ก้อนเมฆและมีการถ่ายเทประจุลบจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน (ฟ้าผ่าขึ้น ขั้วลบ) ลีดเดอร์เคลื่อนที่จากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินและมีการถ่ายเทประจุบวกจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน (ฟ้าผ่าลง ขั้วบวก) ลีดเดอร์เคลื่อนที่จากพื้นดินขึ้นสู่ก้อนเมฆและมีการถ่ายเทประจุบวกจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน (ฟ้าผ่าขึ้น ขั้วบวก) ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าลงและฟ้าผ่าขึ้นที่บันทึกได้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 (Salanave, 1980 :13,26)



(ก) ฟ้าผ่าลง

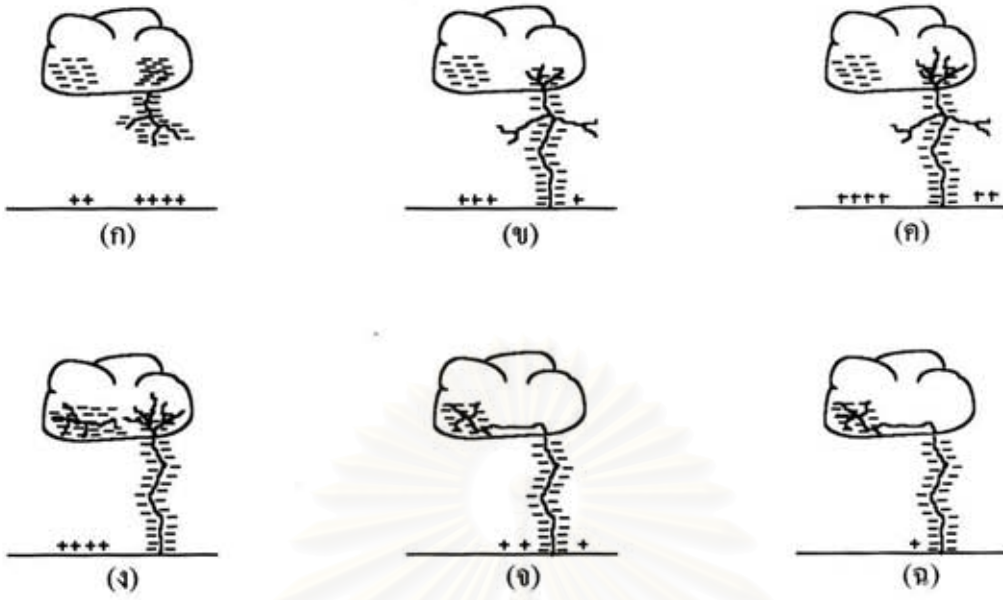


(ข) ฟ้าม่าขึ้น

รูปที่ 2.1 ลักษณะของฟ้าม่า

การแยกแยะฟ้าม่าชั่วลบและฟ้าม่าชั่วบวกสามารถแยกแยะได้จากรูปคลื่นกระแสฟ้าม่าทางไฟฟ้า ถ้ารูปคลื่นกระแสฟ้าม่าเป็นอิมพัลส์ลบ ฟ้าม่านั้นก็จะเป็นฟ้าม่าลบ ในทำนองเดียวกัน ถ้ารูปคลื่นกระแสฟ้าม่าเป็นอิมพัลส์บวก ฟ้าม่านั้นก็จะเป็นฟ้าม่าบวก ส่วนการแยกแยะว่าฟ้าม่าที่เกิดขึ้นเป็นฟ้าม่าลงหรือฟ้าม่าขึ้นสามารถทำได้โดยการสังเกตลำแสงของฟ้าม่า ถ้าลำฟ้าม่ามีแขนงแตกกระจายออกในทิศทางที่ลงสู่พื้นโลก ฟ้าม่านั้นก็จะเป็นฟ้าม่าลง แต่ถ้าเป็นฟ้าม่าขึ้น การขยายตัวของแขนงต่างๆในลำฟ้าม่าจะมีทิศทางขึ้นสู่ก้อนเมฆ โดยลิดเดอร์จะเริ่มก่อตัวจากวัตถุหรือสิ่งก่อสร้างสูงๆ เช่นยอดเสาสูงหรือสิ่งก่อสร้างบนอาคารสูง เป็นต้น และโดยทั่วไปฟ้าม่าชั่วลบจะเกิดบ่อยกว่าฟ้าม่าชั่วบวก (Berger , 1975 ; Supatra Bhumiwat , 1996)

รูปที่ 2.2 (Cobine , 1958 : 198) ได้แสดงถึงกรณีที่อากาศในลำฟ้าม่ายังไม่คืนตัวสู่สภาพการเป็นฉนวนหลังจากฟ้าม่าในลำฟ้าม่าแรก (Main Stroke) ก้อนเมฆจึงสามารถคายประจุได้อีกในลำฟ้าม่านั้นถ้ายังมีประจุอยู่ในส่วนอื่นของก้อนเมฆที่ยังไม่ดิสชาร์จ การคายประจุจากก้อนเมฆครั้งถัดมานี้เรียกว่าฟ้าม่าตาม (หรือฟ้าม่าซ้ำ) ลักษณะของฟ้าม่าตามจะไม่มีแขนงเพราะลิดเดอร์ไม่ได้เคลื่อนที่เป็นช่วงก้าว แต่วิ่งลงมาในลำฟ้าม่าอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความชันของกระแสฟ้าม่าตามจะมีค่าสูงมาก ฟ้าม่าตามอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง (Multistroke) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3 (Salanave , 1980 : 50) โดยช่วงเวลาระหว่างการเกิดแต่ละครั้งอยู่ในหลักของมิลลิวินาที โดยทั่วไปจำนวนฟ้าม่าซ้ำจะมี 2-3 ครั้ง อย่างไรก็ตามจำนวนฟ้าม่าต่อเนื่องอาจมีค่าสูงถึง 40 ครั้ง (Cobine , 1958 : 200-201)



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ



รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าซ้ำหลายครั้ง

รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าเป็นสิ่งที่สามารถบ่งบอกความรุนแรงของฟ้าผ่าได้ เพราะนอกจากจะทราบชื่อของฟ้าผ่าแล้ว ยังทราบความชันกระแสฟ้าผ่า ช่วงเวลาดำเนิน-หลังคลื่น และปริมาณของประจุที่กระจายจากก้อนเมฆสู่พื้นโลกอีกด้วย (Berger , 1975 , 1977 : 119-190) ตารางที่ 2.1 แสดงถึงพารามิเตอร์ของฟ้าผ่าซึ่งทำการเก็บข้อมูลที่ Monte San Salvatore ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ โดย Prof. Dr. Ing K. Berger ระหว่างปี ค.ศ. 1963 ถึง ค.ศ. 1971 (Berger , 1975) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ช่วงเวลาดำเนินของกระแสฟ้าผ่าตามมีเวลาเป็นไมโครวินาที ส่วนช่วงเวลาดังคลื่นมีค่าเป็นสิบๆ ไมโครวินาที แต่กรณีฟ้าผ่าบวก เวลาในการกระจายจะยาวนานกว่าฟ้าผ่าลบโดยมีรูปคลื่นกระแสที่คล้ายคลึงกัน ฟ้าผ่าบวกจึงมีปริมาณของประจุที่กระจายจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินมากกว่าฟ้าผ่าลบ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของฟ้าผ่า

N	Parameter	Unit	Percent of cases exceeding tabulated value		
			95%	50%	5%
	Peak Current (minimum 2 kA)				
101	<i>negative first strokes and flashes</i>	kA	14	30	80
135	<i>negative following strokes</i>	kA	4.6	12	30
26	<i>positive flashes</i> (no following strokes)	kA	4.6	35	250
	Charge				
93	<i>negative first strokes</i>	C	1.1	5.2	24
122	<i>negative following strokes</i>	C	0.2	1.4	11
94	<i>negative flashes</i>	C	1.3	7.5	40
26	<i>positive flashes</i>	C	20	80	350
	Impulse Charge				
90	<i>negative first strokes</i>	C	1.1	4.5	20
117	<i>negative following strokes</i>	C	0.22	0.95	4.0
25	<i>positive flashes (only one stroke)</i>	C	2.0	16	150
133	Time Intervals between <i>Negative Strokes</i>	ms	7	33	150

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของฟ้าผ่า (ต่อ)

N	Parameter	Unit	Percent of cases exceeding tabulated value		
			95%	50%	5%
	Front Duration				
89	<i>negative first strokes</i>	μs	1.8	5.5	18
118	<i>negative following strokes</i>	μs	0.22	1.1	4.5
19	<i>positive flashes</i>	μs	3.5	22	200
	Maximum di/dt				
92	<i>negative first strokes</i>	$\text{kA}/\mu\text{s}$	5.5	12	32
122	<i>negative following strokes and flashes</i>	$\text{kA}/\mu\text{s}$	12	40	120
21	<i>positive flashes</i>	$\text{kA}/\mu\text{s}$	0.20	2.4	32
	Stroke Duration				
90	<i>negative first strokes</i>	μs	30	75	200
115	<i>negative following strokes</i>	μs	6.5	32	140
16	<i>positive flashes</i>	μs	25	230	2000
	Integral ($\int i^2 dt$)				
91	<i>negative first strokes and flashes</i>	A^2s	6.0×10^3	5.5×10^4	5.5×10^5
88	<i>negative following strokes</i>	A^2s	5.5×10^2	6.0×10^3	5.2×10^4
26	<i>positive flashes</i>	A^2s	2.5×10^4	6.5×10^5	1.5×10^7
	Flashes Duration				
94	<i>negative (including single stroke flashes)</i>	ms	0.15	13	1100
39	<i>negative (excluding single stroke flashes)</i>	ms	31	180	900
24	<i>positive</i>	ms	14	85	500

2.2 ผลของฟ้าผ่า

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าหลังจากเกิดฟ้าผ่าจะมีผลกระทบตามมา 3 ประการคือ ผลทางความร้อน , ผลทางกล และผลทางไฟฟ้า ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะผลทางไฟฟ้า (ส่วนผลทางความร้อนและผลทางกล ผู้สนใจสามารถดูรายละเอียดได้ในหนังสือหรือบทความเกี่ยวกับฟ้าผ่า (สำรวจ สังข์สะอาด , 1985 : 355 ; Lee , 1977 : 521-632) ผลทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ ผลทางตรง ซึ่งเกิดจากฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้า (OGW) หรือบริเวณใกล้เคียงสายส่ง ทำให้เกิดแรงดันแล้วที่สายล่อฟ้า นำไปสู่การรวมไฟตามผิวย้อนกลับจากสายล่อฟ้าผ่านถูกด้วยลงที่สายส่งทำให้ไฟฟ้าดับ อย่างไรก็ตามอาจเกิดฟ้าผ่าลงโดยตรงที่สายส่ง ในกรณีนี้ถ้าฟ้าผ่าจะประพาดเป็นตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส ก่อให้เกิดกระแสฟ้าผ่าค่าสูงไหลออกจากจุดที่ฟ้าผ่าออกไปทั้งซ้ายและขวาในลักษณะของคลื่นจร (Travelling Wave) ทำความเสียหายให้กับการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นเช่นหม้อแปลง เมื่อคลื่นจรวิ่งมากระทบอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เช่นหม้อแปลงไฟฟ้า ก็อาจทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้นได้

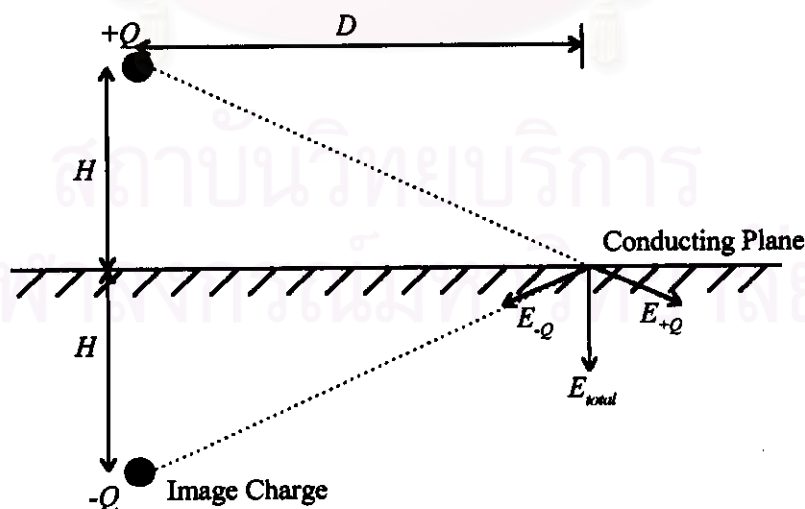
ผลกระทบทางอ้อมนั้น เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปทุกทิศทางจากล้าฟ้าผ่าไปรบกวนระบบสื่อสาร ระบบควบคุมและวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ความไวสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) M (Uman , 1984 : 49-62) ดังนี้

$$M = 2 \sum_i Q_i H_i \quad (2.1)$$

โดย M = ไดโพลโมเมนต์

Q_i = ประจุที่ความสูง H_i

H_i = ความสูงล้าฟ้าผ่าจากพื้นดินถึงระยะ H_i เมตร



รูปที่ 2.4 ไดโพลโมเมนต์เนื่องจากประจุในล้าฟ้าผ่า (Uman , 1984 : 49)

จากสมการของไดโพลโมเมนต์ สามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B ที่กระจายจากลำฟ้าผ่าได้ดังนี้

$$E = \frac{[M]}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (2.2)$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{\mu_0}{4\pi c D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (2.3)$$

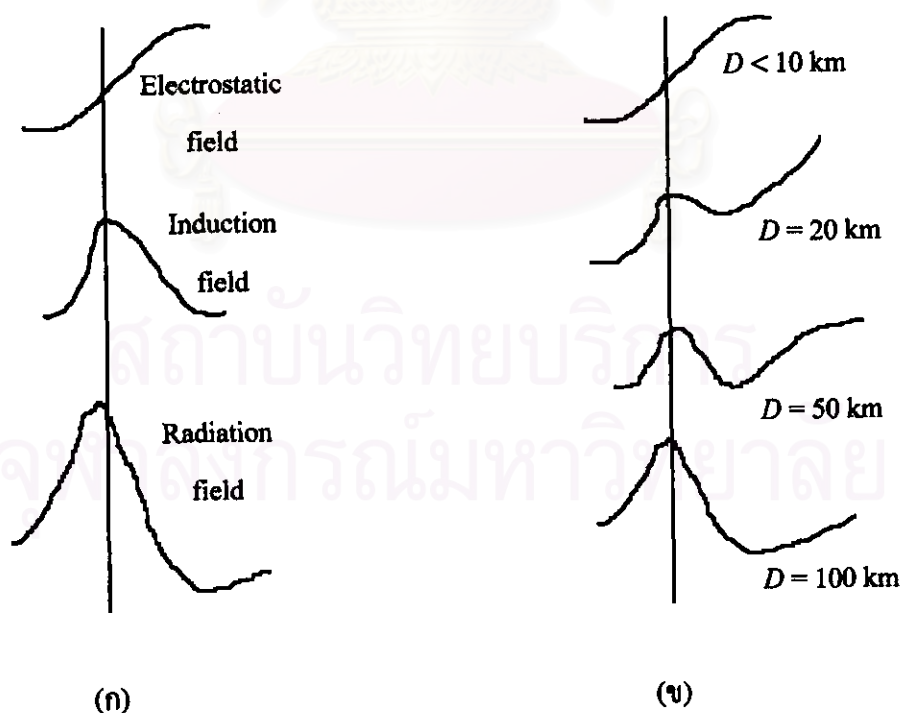
โดย D = ระยะทางในแนวระดับจากลำฟ้าผ่าถึงจุดที่ต้องการหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (m)

$$c = \text{ความเร็วแสง (m/s)} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

พจน์แรกและพจน์ที่สองของสมการ(2.2) คือพจน์ของสนามไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Field) และพจน์ของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Field) ตามลำดับ และพจน์ที่สามเป็นพจน์ของสนามไฟฟ้าแพร่กระจาย (Radiation Field) จากสมการ (2.2) จะสังเกตได้ว่า ที่ระยะ D มากขึ้น พจน์ของสนามไฟฟ้าสถิตย์และสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะหายไป เหลือแต่เพียงสนามไฟฟ้าแพร่กระจายเท่านั้น ลักษณะของสนามไฟฟ้าแต่ละแบบและรูปคลื่นสนามไฟฟ้าที่ระยะทางในแนวระดับ D ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 (Uman, 1984 : 62)



รูปที่ 2.5 (ก) เทอนต่างๆของสนามไฟฟ้าตามสมการ (2.2)

(ข) รูปคลื่นสนามไฟฟ้าที่ระยะทางต่างๆ

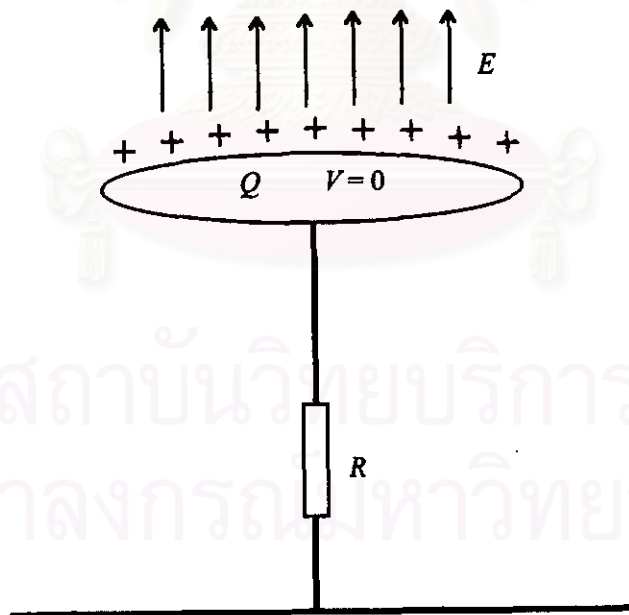
สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเข้าไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วอุปกรณ์เหล่านี้จะมีความต้านทานต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกได้ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามถ้ามีการชดเชยอุปกรณ์เหล่านี้ สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าก็จะเข้าไปรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ได้น้อยลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและความหนาของโลหะที่ใช้

2.3 การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากฟ้าผ่า

วิธีทางไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการเก็บข้อมูลจากฟ้าผ่าคือ การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสฟ้าผ่าโดยใช้สายอากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังที่จะได้กล่าวต่อไปนี้

2.3.1 สายอากาศและความสูงประสิทธิภาพของสายอากาศ

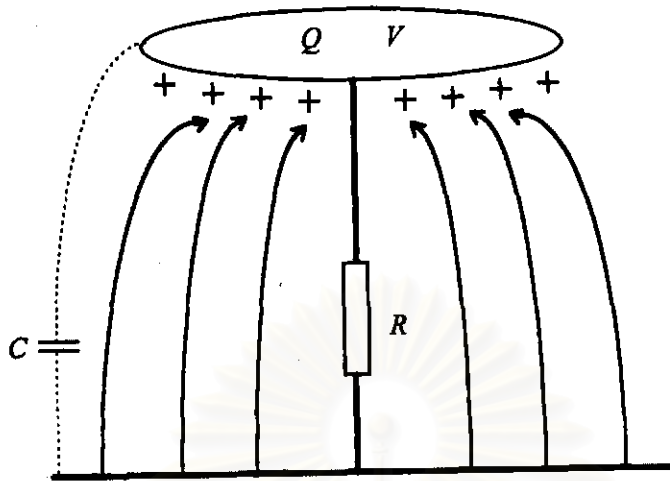
คำอธิบายของการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ตัวนำโลหะที่ใช้เป็นสายอากาศ (Pister, 1992) คือ ตัวนำโลหะที่ต่อลงดินผ่านความต้านทาน R ซึ่งอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า E (เช่น สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก) จะมีประจุ Q ที่ผิวของตัวนำโลหะเนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้า E ดังรูปที่ 2.6 แต่เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน R ศักยภาพที่ผิวของตัวนำโลหะจึงเท่ากับดิน คือ 0 โวลต์



รูปที่ 2.6 ตัวนำโลหะภายใต้สนามไฟฟ้า

ต่อมาถ้าสนามไฟฟ้า E หายไปอย่างทันทีทันใด (เช่น เกิดฟ้าผ่า ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่พื้นโลก) ประจุ Q จะเคลื่อนที่ในทิศทางต่อต้านการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ทำให้

เกิดศักดาไฟฟ้าที่ตัวนำโลหะ V ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Q และ C ($V=f(Q,C)$) โดย Q คือประจุไฟฟ้า และ C คือความจุไฟฟ้าที่ตัวนำโลหะกับดิน ดังรูปที่ 2.7



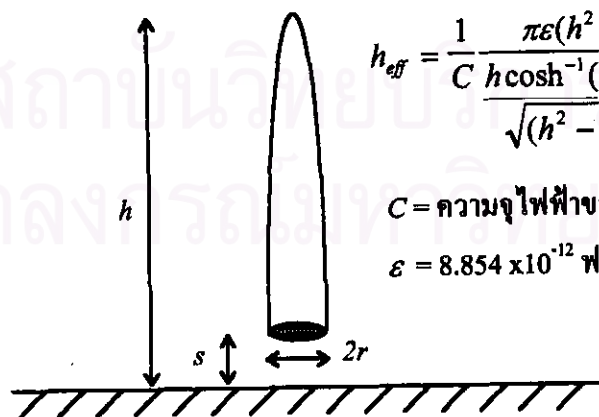
รูปที่ 2.7 ตัวนำโลหะหลังจากสนามไฟฟ้าหายไปอย่างทันทีทันใด

แรงดัน V ครอบคลุมความต้านทาน R จะเท่ากับความต่างศักดาไฟฟ้าของตัวนำโลหะกับดิน ซึ่งมีค่าลดลงตามเวลาขึ้นกับค่าคงตัวเวลา RC ขนาดของแรงดัน V ณ เวลาที่สนามไฟฟ้าหายไปอย่างทันทีทันใด สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V = h_{eff} E \quad (2.4)$$

โดย h_{eff} คือ ความสูงประสิทธิผล (Effective Height) ของตัวนำโลหะ (หรือสายอากาศ) มีหน่วยเป็นเมตร ที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าขนาด E โวลต์/เมตร

ตัวอย่างของสายอากาศที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 และ 2.9 สำหรับคำอธิบายวิธีการหาค่าความสูงประสิทธิผลของสายอากาศแบบต่างๆ จะได้กล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

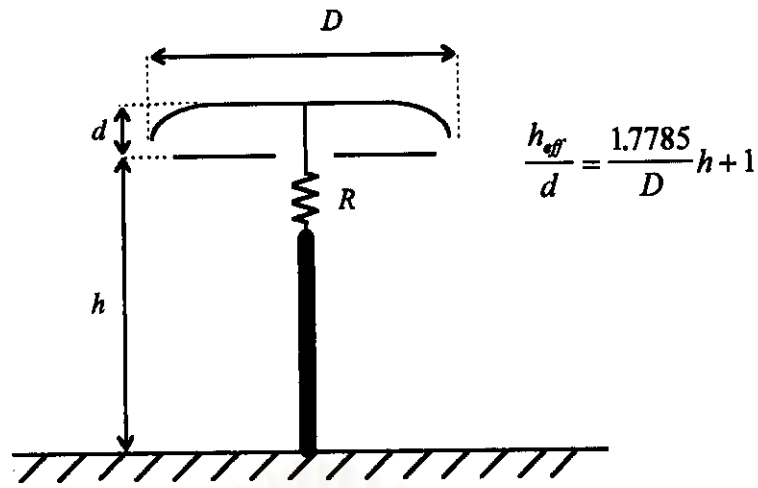


$$h_{eff} = \frac{1}{C} \frac{\pi \epsilon (h^2 - r^2)}{h \cosh^{-1}(h/r) - \sqrt{(h^2 - r^2)}} \cdot (1 - (s/h)^2)$$

C = ความจุไฟฟ้าของสายอากาศ (ฟารัด)

$\epsilon = 8.854 \times 10^{-12}$ ฟารัด/เมตร

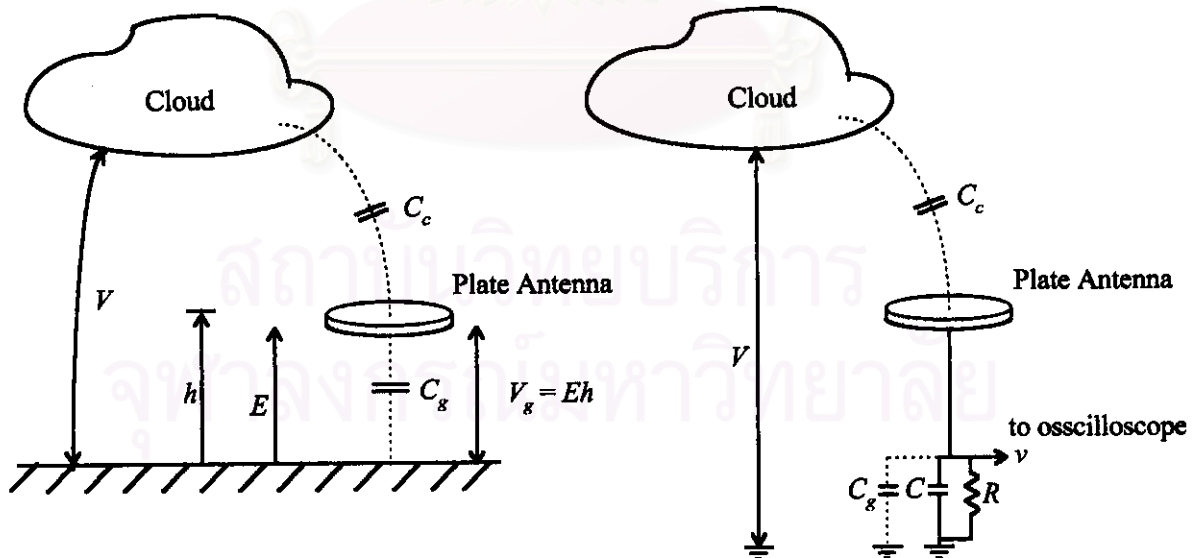
รูปที่ 2.8 สายอากาศแบบแท่งและค่าความสูงประสิทธิผล



รูปที่ 2.9 สายอากาศแบบจานกลมและค่าความสูงประสิทธิผล

2.3.2 การวัดสนามไฟฟ้าจากกระแสฟ้าผ่า

การวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายมาจากลำฟ้าผ่าทำได้โดยใช้สายอากาศ ผลของการวัดจะเป็นแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศกับดิน แรงดันเหนี่ยวนำที่สายอากาศจะมีค่าเท่าใด ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของสายอากาศ และขนาดของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่สายอากาศ รูปที่ 2.10 (Uman, 1984, 64) ได้แสดงถึงตัวอย่างหนึ่งในการวัดสนามไฟฟ้าจากลำฟ้าผ่าโดยใช้สายอากาศแบบจานกลม (Plate Antenna) โดยให้สายอากาศนี้อยู่สูงจากพื้นดิน h เมตร มีสเตอริยแองเกิลระหว่างกึ่งวงกลมกับสายอากาศเท่ากับ C_c และมีความจุไฟฟ้าระหว่างสายอากาศกับดินเท่ากับ C_g



(ก) กรณีไม่โหลดสายอากาศ

(ข) กรณีโหลดสายอากาศ

รูปที่ 2.10 การวัดสนามไฟฟ้าจากฟ้าผ่า

ถ้า V คือ ความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก ความต่างศักย์ระหว่างสายอากาศกับพื้นดิน (V_g) จะเป็น

$$V_g = \frac{C_c}{(C_g + C_c)} \cdot V \quad (2.5)$$

ในกรณีที่สายอากาศนั้นมีความสูงประสิทธิผลเท่ากับ h_{eff} สมการ (2.5) จะเขียนได้เป็น

$$V = Eh_{eff} \frac{(C_c + C_g)}{C_c} \quad (2.6)$$

เมื่อสายอากาศมีวงจรวัดต่ออยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) วงจรวัดจะโหลดสายอากาศ ทำให้แรงดันที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า V_g (ซึ่งเป็น Open Circuit Voltage) โดยทั่วไปค่าของ R จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของ C จึงทำให้ตัวเลขผลของ R ได้ แรงดัน v ที่วงจรวัดก่อนเข้าออสซิลโลสโคปจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$v = V \frac{C_c}{(C_c + C_g + C)} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) นำค่าของ V แทนลงในสมการ (2.6) จะได้

$$v = Eh_{eff} \frac{(C_c + C_g)}{(C_c + C_g + C)} \quad (2.8)$$

แต่เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าสเตรระหว่างสายอากาศกับพื้นโลก มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าสเตรระหว่างก้อนเมฆกับสายอากาศ ($C_g \gg C_c$) ดังนั้น สมการ (2.8) จะลดรูปได้เป็น

$$v = Eh_{eff} \frac{C_c}{(C_c + C)} = Ek \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้ (v) เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า E ค่าคงตัว k ของความสัมพันธ์ระหว่าง v กับ E สามารถคำนวณได้ในทางปฏิบัติ และเนื่องจากตัวเก็บประจุของวงจรวัดก่อนเข้าออสซิลโลสโคปจะมีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้าสเตรระหว่างสายอากาศกับพื้นโลกมาก ($C \gg C_c$) ดังนั้นค่าคงตัวของแรงดันที่วัดได้จะมีค่าประมาณ RC ซึ่งในกรณีที่นำสายอากาศแบบนี้วัดสนามไฟฟ้าจากลำฟ้าผ่าเพื่อดูจำนวนฟ้าผ่าซ้ำ ค่าคงตัวของวงจรวัดจะต้องมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาสั้นที่สุดระหว่างฟ้าผ่าซ้ำที่อยู่ติดกัน เพื่อให้สามารถแยกแยะฟ้าผ่าซ้ำได้

2.3.3 การวัดสนามแม่เหล็กจากฟ้าผ่า

สนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายจากลำฟ้าผ่าสามารถวัดได้โดยใช้สายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) แรงดันเหนี่ยวนำที่สายอากาศแบบบ่วง ที่มีพื้นที่ A และวางอยู่ในแนวตั้งฉากกับความเข้มสนามแม่เหล็ก B ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลง dB/dt จะเป็น

$$V_{antenna} = A \frac{dB}{dt} \quad (2.10)$$

โดยสมการ (2.10) แรงดันที่ได้คือ แรงดันเปิดวงจร (Open Loop Voltage)

ในกรณีที่มีการต่อวงจรวัดที่สายอากาศแบบบ่วง ค่าความต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C ต่ออนุกรมกับสายอากาศแบบบ่วง ทำให้มีกระแส i ไหลผ่าน R และ C ดังนั้น สมการของแรงดันที่สายอากาศแบบบ่วง จะเป็น

$$A \frac{dB}{dt} = Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i dt' \quad (2.11)$$

โดยจะถือว่า ที่เวลาเริ่มต้นไม่มีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ถ้าเลือกให้ $Ri \gg \frac{1}{C} \int_0^t i dt'$ จะสามารถละเลยแรงดันเนื่องจากค่า C ดังนั้น ค่ากระแส i ในวงจรวัดจะมีสมการเป็น

$$i \cong \frac{A}{R} \frac{dB}{dt} \quad (2.12)$$

และเนื่องจากแรงดันออกของวงจรเป็นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ดังนั้น สัญญาณออกจะเป็น

$$V_c(t) = \frac{A}{RC} \int_0^t \frac{dB}{dt'} dt' = \frac{A}{RC} B(t) = kB(t) \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันออก $V_c(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มสนามแม่เหล็ก $B(t)$ โดยค่าคงตัว k ระหว่าง $V_c(t)$ และ $B(t)$ สามารถหาได้ในทางปฏิบัติ