หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2
# ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่าและหลักการสร้างกระแสอิมพัลส์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่าที่ยอมรับกัน เช่น ฟ้าผ่าลง ฟ้าผ่าขึ้น รวมทั้งฟ้าผ่าต่อเนื่องหรือฟ้าผ่าซ้ำ โดยจะกล่าวถึงแต่เพียงผลทางไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนั้นจะได้กล่าวถึงหลักการสร้างกระแสอิมพัลส์ซึ่งใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

## 2.1 ลักษณะสำคัญของฟ้าผ่า

ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฟ้าผ่าสามารถกำหนดด้วยสิ่งต่อไปนี้ คือ ฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง ขั้วของกระแสฟ้าผ่าเป็นบวกหรือลบ ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่า จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง ฯลฯ

### 2.1.1 การเกิดฟ้าผ่า

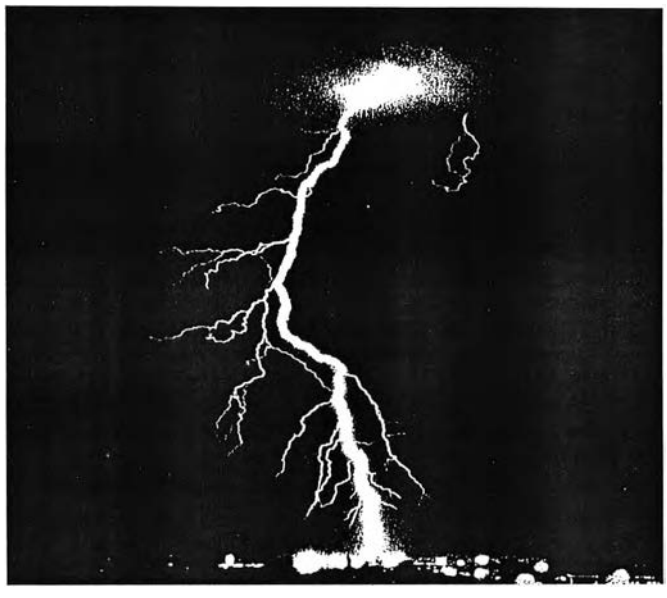
คำอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดฟ้าผ่ามีหลายทฤษฎีแต่โดยสรุปแล้วทฤษฎีต่างๆเหล่านั้นได้อธิบายถึงประจุอิสระสะสมภายในก้อนเมฆที่เกิดจากการเสียดสีของอากาศกับละอองไอน้ำในก้อนเมฆทำให้ละอองน้ำส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบและอากาศมีประจุเป็นบวกเพราะสูญเสียอิเล็คตรอนให้กับละอองน้ำ กระแสลมจะพัดพาอากาศที่มีประจุบวกขึ้นสู่ด้านบนของก้อนเมฆทำให้บริเวณส่วนบนของก้อนเมฆมีการสะสมของประจุบวกส่วนล่างของก้อนเมฆจะมีประจุลบ จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างกลุ่มประจุบวกกับประจุลบหรือทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำขึ้นที่พื้นโลกด้วย ความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงขึ้นเมื่อประจุสะสมมากขึ้น ถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤต ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศที่สภาวะบรรยากาศมีค่าประมาณ 25-30 kV/m [7] เนื่องจากก้อนเมฆอยู่ที่ระดับสูงเหนือพื้นโลกซึ่งมีสภาวะความดันบรรยากาศต่ำ ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตจึงมีค่าประมาณ 10 kV/m เท่านั้น การเกิดการดีสชาร์จจะมีลักษณะเป็นช่วงก้าว (Step) ประจุที่อยู่ส่วนหัวของดีสชาร์จที่กำลังกรุยทางอย่างสุ่มๆนี้เรียกว่า **หัวนำร่องหรือลีดเดอร์** (Leader)

การเคลื่อนที่ของลีดเดอร์ก็จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากอากาศจะเกิดไอออไนเซชั่นได้ง่ายในแนวทางนี้ การคืบหน้าของลีดเดอร์จะมีลักษณะเป็นจังหวะก้าว แต่ละก้าวจะมีความยาวประมาณ 10-150 เมตร (ค่าเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร) และความเร็วของหัวนำร่องนี้มีค่าประมาณ 10 ถึง 100 km/s นอกจากนั้นยังมีช่วงพักก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไปราว 10 ถึง 50 μs

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลีดเดอร์มีลักษณะแบบสุ่ม ดังนั้น ลีดเดอร์จึงอาจวิ่งจากก้อนเมฆหนึ่งไปสู่อีกก้อนเมฆหนึ่ง (Cloud to Cloud) หรืออาจวิ่งจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก (Cloud to Ground) ก็ได้ ในกรณีที่ลีดเดอร์เคลื่อนที่เป็นช่วงก้าวจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกก้าวสุดท้ายของลีดเดอร์จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากที่พื้นโลก ทำให้เกิดสตรีมเมอร์วิ่งขึ้นจากพื้นโลกเข้าหาลีดเดอร์จนบรรจบกัน ก้อนเมฆกับพื้นโลกจึงเชื่อมต่อถึงกัน ประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆจะดีสชาร์จผ่านเส้นทางที่ลีดเดอร์ได้กรุยทางไว้โดยใช้เวลาประมาณ 10-100 μs ลำประจุที่ดีสชาร์จลงสู่พื้นโลก นี้เรียกว่า **ลำฟ้าผ่า** (Main Stroke) และกระแสจำนวนมากที่ไหลผ่านตามเส้นทางนี้ เรียกว่า **กระแสฟ้าผ่า** (Lightning Current)

ปรากฏการณ์ที่ประจุในก้อนเมฆดีสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น เรียกว่า **ฟ้าผ่าลง** การเกิดฟ้าผ่ามีกระบวนการเป็นไปในช่วงระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว ไม่อาจสังเกตเห็นขั้นตอนได้ แต่อาจสังเกตดูจากลำแสงฟ้าผ่าถ้าเป็นฟ้าผ่าลงจะมีลักษณะเป็นแขนงแตกจากลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ ดังในรูปที่ 2-1ก) ทั้งนี้เนื่องจากหัวนำร่องกรุยทางลงมานั้นขยายตัวลงมาหลายๆทางแล้วแต่ว่าทางใดจะขยายตัวได้ง่ายกว่า ฟ้าผ่าอาจจะเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆก็ได้ เรียกว่า **ฟ้าผ่าขึ้น** คือ หัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจากวัตถุหรือสิ่งก่อสร้างสูงๆในพื้นที่ราบโดยเริ่มจากยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาหรือยอดหอคอยสูงๆหรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง หัวนำร่องมีกระบวนการคืบหน้าเป็นจังหวะก้าวในทิศทางขึ้นไปสู่ก้อนเมฆทำนองเดียวกับหัวนำร่องที่เริ่มก่อตัวจากก้อนเมฆแล้ววิ่งลงสู่พื้นโลกของฟ้าผ่าลง

จากการสังเกตจะพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักจะเป็นผลสืบเนื่องจากฟ้าผ่าลง ลักษณะของฟ้าผ่าขึ้นจะสังเกตเห็นมีแขนงวิ่งขึ้นสู่เบื้องบนเหมือนรากไม้ชี้ขึ้น ดังในรูปที่ 2-1 ข)



2-1 ก) ภาพถ่ายฟ้าผ่าลง

2-1 ข) ภาพถ่ายฟ้าผ่าขึ้น

รูปที่ 2-1 ภาพถ่ายฟ้าผ่าลงและฟ้าผ่าขึ้น

### 2.1.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่าเป็นกระแสทรานเซียนต์ที่ไหลทางเดียวอาจเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ กระแสฟ้าผ่าบวกหมายถึง ลำฟ้าผ่าที่นำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดีสชาร์จลงสู่พื้นโลกส่วนกระแสฟ้าผ่าลบหมายถึง ลำฟ้าผ่าที่นำเอาประจุลบจากก้อนเมฆดีสชาร์จลงสู่พื้นโลก

จากการบันทึกรวบรวมข้อมูลฟ้าผ่าจะพบว่าประมาณร้อยละ 80 ของฟ้าผ่าสู่พื้นโลกเป็นฟ้าผ่าลบ ร้อยละ 20 เป็นฟ้าผ่าบวก และเป็นที่น่าสังเกตประการหนึ่งของลำฟ้าผ่าคือ ฟ้าผ่าลบสู่พื้นโลกมักจะเป็นฟ้าผ่าซ้ำต่อเนื่องหลายครั้ง ถ้าเป็นฟ้าผ่าบวกมักจะเป็นลำฟ้าผ่าเดี่ยว

### 2.1.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ากำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นเวลาช่วงหน้าคลื่นหมายถึง เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่นหมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่นคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสเรียกว่า **ความชัน** วัดเป็น kA/μs ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำมากน้อยในสายตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ โดยเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า

จากการบันทึกรูปคลื่นฟ้าผ่าเป็นจำนวนมากจะพบว่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นจะมีค่าต่างๆกันขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือเป็นลบ ในกรณีฟ้าผ่าลบจะมีช่วงหน้าคลื่นประมาณ 1 ถึง 18 μs และเวลาช่วงหางคลื่นประมาณ 5 ถึง 120 μs ส่วนฟ้าผ่าบวกจะมีช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วงประมาณ 3.5 ถึง 200 μs และเวลาช่วงหางคลื่นจะอยู่ในช่วงประมาณ 25 ถึง 2,000 μs นั่นคือโดยเฉลี่ยฟ้าผ่าบวกจะมีความชันของหน้าคลื่นน้อยกว่า และเวลาช่วงหางคลื่นยาวกว่าหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ จำนวนประจุของฟ้าผ่าบวกมากกว่าฟ้าผ่าลบ

### 2.1.4 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

การวัดขนาดของกระแสฟ้าผ่าเป็นการวัดค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าซึ่งขนาดกระแสฟ้าผ่าจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุที่ดีสชาร์จ นั่นคือขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง จากการบันทึกของ Berger [7] พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 kA และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 kA สถิติการกระจายของกระแสฟ้าผ่าที่วัดได้จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ภาคใต้ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ระหว่างปี 1963 ถึง 1971 พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าเฉลี่ย (ที่ความน่าจะเป็น 50 % ) ประมาณ 30 kA สำหรับฟ้าผ่าลำแรก และลำฟ้าผ่าตามประมาณ 12 kA ส่วนค่าเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกอยู่ประมาณ 35 kA พารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่า คือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า ประจุในลำฟ้าผ่า ช่วงเวลาหน้าคลื่น และความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีความน่าจะเกิดที่ร้อยละ 95,50 และ 5 ซึ่งเป็นผลงานบันทึกของ Berger ได้แสดงให้ในตารางที่ 2.1

### 2.1.5 ฟ้าผ่าซ้ำ

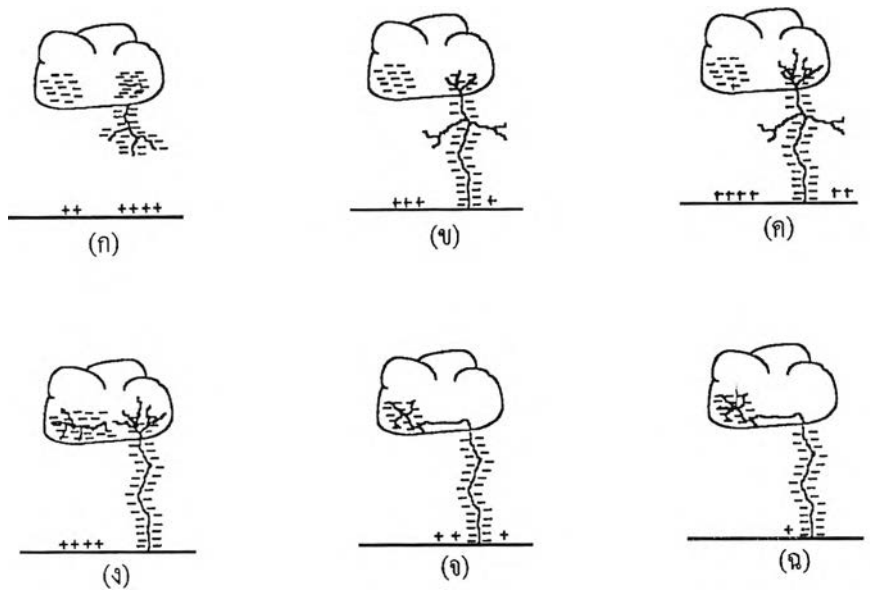
ถ้าสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่ามักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรกๆ ซึ่งบางทีก็มีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจจะอธิบายได้ว่าในก้อนเมฆอาจมีศูนย์กลางรวมของกลุ่มประจุหลายแห่ง เมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อนก็จะดีสชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าวิ่งไปตามแนวที่เกิดการแตกตัวของอากาศระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน เนื่องจากกระแสมีค่าสูงมากและไหลอยู่เป็นเวลานาน เช่น เมื่อผ่าลงมาแล้วถึง 10 ms ยังมีกระแสไหลอยู่ถึง 200-300 A หรือแม้ว่ากระแสจะหยุดไหลไปแล้วเป็นระยะเวลา 10 ถึง 100 ms ก็ตาม

หลังจากกลุ่มประจุแรกดีสชาร์จไปหมดแล้วก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆและเกิดดีสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวลำฟ้าผ่าลำแรก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอากาศในแนวที่ลำฟ้าผ่าวิ่งผ่านลงมานั้นยังไม่คืนตัวมีสภาพเป็นฉนวนได้ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากมีไอออนอยู่จึงเป็นเหตุให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นสามารถดีสชาร์จติดต่อกันได้ง่ายตามแนวนี้อีก เรียกว่า **ฟ้าผ่าตาม (หรือฟ้าผ่าซ้ำ)** ดังรูปที่ 2-2

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่า*

| จำนวนฟ้าผ่า | พารามิเตอร์ | หน่วย | ความน่าจะเกิดเป็นร้อยละ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 95 | 50 | 5 |
| | **ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า** | | | | |
| 99 | กระแสฟ้าผ่าลบลำแรก | kA | 14 | 30 | 80 |
| 137 | กระแสฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม | kA | 4.6 | 12 | 30 |
| 28 | กระแสฟ้าผ่าบวก | kA | 4.6 | 35 | 250 |
| | **ประจุไฟฟ้า** | | | | |
| 91 | ประจุไฟฟ้าลบลำแรก | C | 1.1 | 5.2 | 24 |
| 124 | ประจุฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม | C | 0.2 | 1.4 | 11 |
| 88 | ประจุฟ้าผ่าลบทั้งหมด | C | 1.3 | 7.5 | 40 |
| 26 | ประจุฟ้าผ่าบวก | C | 20 | 80 | 350 |
| | **ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์** | | | | |
| 88 | ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำแรก | C | 1.1 | 4.5 | 20 |
| 119 | ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำผ่าตาม | C | 0.22 | 0.95 | 40 |
| 25 | ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์บวก | C | 2.0 | 16 | 150 |
| | **เวลาช่วงหน้าคลื่น** | | | | |
| 87 | ฟ้าผ่าลบลำแรก | μs | 1.8 | 5.5 | 18 |
| 120 | ฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม | μs | 0.22 | 1.1 | 4.5 |
| 19 | ฟ้าผ่าบวก | μs | 3.5 | 22 | 200 |
| | **ความชัน (di/dt)** | | | | |
| 90 | ฟ้าผ่าลบลำแรก | kA/μs | 5.5 | 12 | 32 |
| 124 | ฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม | kA/μs | 12 | 40 | 120 |
| 21 | ฟ้าผ่าบวก | kA/μs | 0.20 | 2.4 | 32 |

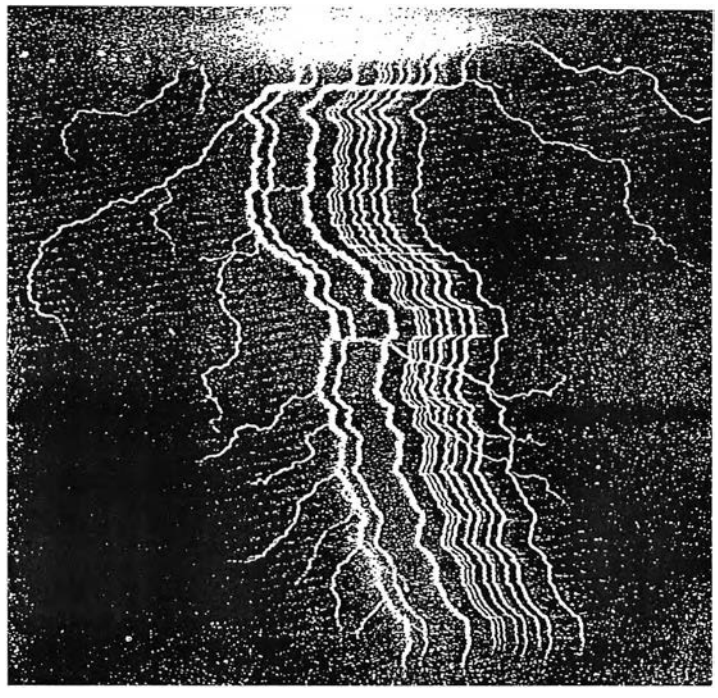
* Berger, k., Methoden und Resultate der Blitzforschung auf den Monte San Salvatore bei Lugano in den Lahren 1963-1971, Bull.SEV 63 (1972) pp. 1403, 1422.




รูปที่ 2-2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ

ฟ้าผ่าซ้ำนี้อาจเกิดซ้ำได้หลายครั้ง (Multistroke) ช่วงเวลาระหว่างแต่ละครั้งประมาณ 15-150 ms (โดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 40 ms) ฟ้าผ่าซ้ำจะมีความรุนแรงมากกว่าฟ้าผ่าเดี่ยว เพราะในฟ้าผ่าซ้ำมีการคายประจุจำนวนมากหลายครั้งในช่วงระยะเวลาอันสั้น ($\leq$1 s) ในขณะที่ประจุไฟฟ้าในฟ้าผ่าเดี่ยวมีน้อยกว่าเพราะมีการคายประจุครั้งเดียว ฟ้าผ่าซ้ำนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแขนงเพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจังหวะก้าวของลีดเดอร์ เวลาช่วงหน้าคลื่นของฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมีความชันสูงมากอาจถึง 120 kA/μs ซึ่งความชันของคลื่นฟ้าผ่าลำแรกจะมีค่าเพียง 32 kA/μs ในขณะที่ความชันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 12 kA/μs

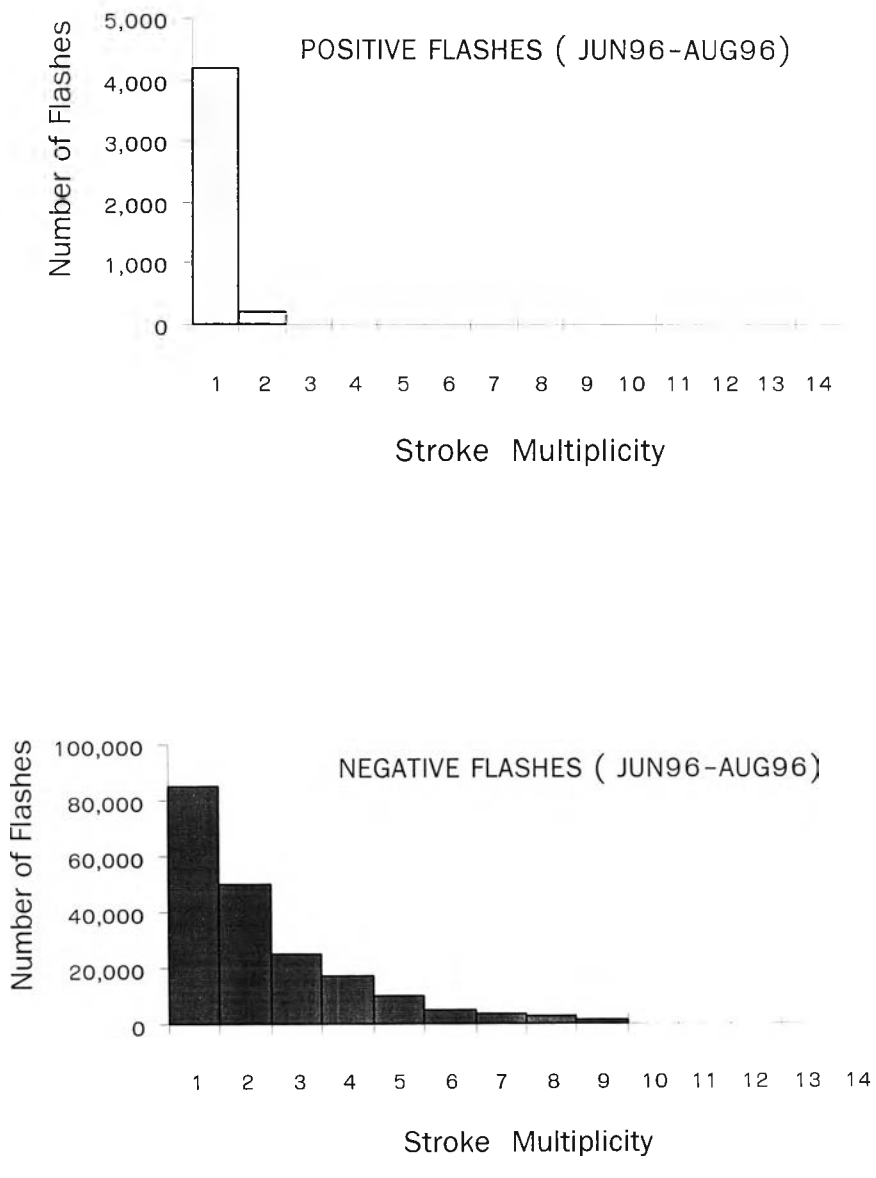
จากการบันทึกพบว่าการเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายๆครั้งนี้จะมีหรือไม่ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ ในประเทศในโซนหนาวจะมีฟ้าผ่าลำเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศโซนร้อนจะมีจำนวนฟ้าผ่าซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง ดังเช่นในประเทศอังกฤษจะมีฟ้าผ่าแต่ละครั้ง 1-2 ลำฟ้าผ่า ในอาฟริกาฟ้าผ่าซ้ำเฉลี่ย 4 ลำฟ้าผ่า และในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่ามีฟ้าผ่าซ้ำถึง 26 ครั้งต่อฟ้าผ่า 1 ครั้ง และพบว่าประมาณร้อยละ 70 ฟ้าผ่าซ้ำจะมีจำนวนในช่วง 1 ครั้ง ถึงมากกว่า 20 ครั้ง ดูรูปที่ 2-3



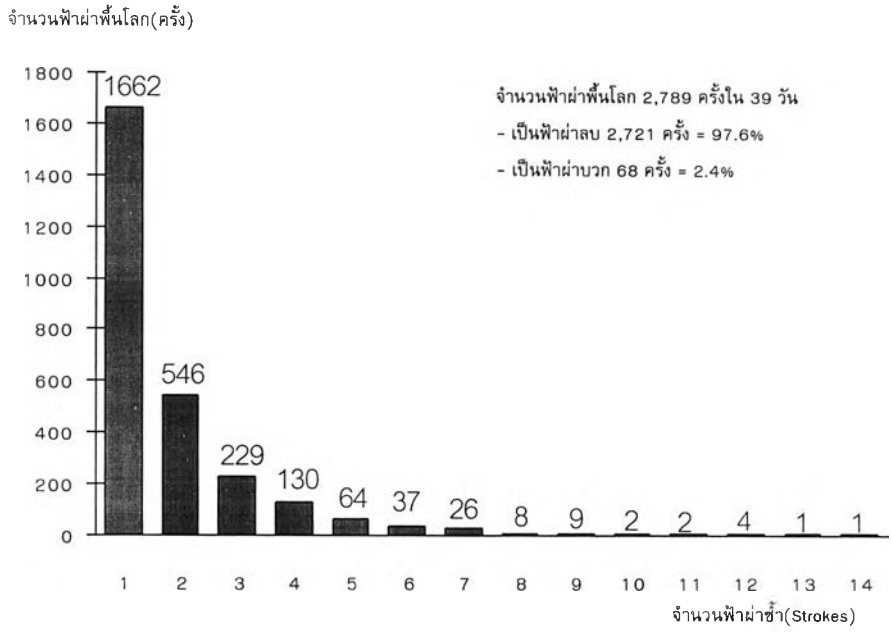
รูปที่ 2-3 ฟ้าผ่าซ้ำหลายครั้ง

ผลของการบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ของฟ้าผ่าในประเทศไทย ด้วยระบบตรวจจับและหาตำแหน่งฟ้าผ่าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปี 2539 (มิถุนายน-สิงหาคม) [8] ปรากฏว่าเกิดฟ้าผ่าบวกน้อยกว่า 4 % ของจำนวนฟ้าผ่าทั้งหมด 528,677 ครั้ง และในจำนวนนี้พบว่าส่วนใหญ่ของฟ้าผ่าซ้ำเป็นขั้วลบซึ่งมีโอกาสเกิดฟ้าผ่าซ้ำสูงถึง 9 ครั้ง แต่ฟ้าผ่าบวกส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าผ่าเดี่ยว จะผ่าซ้ำอย่างมากเพียง 2 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2-4

การศึกษาวิจัยนับจำนวนฟ้าผ่าซ้ำที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องนับฟ้าผ่าที่พัฒนาขึ้นมาจากวงจรเครื่องนับฟ้าผ่าของ CIGRE ให้สามารถนับจำนวนฟ้าผ่าซ้ำของฟ้าผ่าแต่ละครั้งแยกเป็นขั้วลบขั้วบวกได้ และสามารถบันทึกวันเวลาที่เกิดขึ้นจริงได้ด้วย [9] พบว่ามีจำนวนฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก 2,798 ครั้ง (ผลของการใช้เครื่องนับฟ้าผ่าซ้ำในช่วงวันที่ 19 กันยายน 2540 ถึง 27 ตุลาคม 2540 เป็นเวลา 39 วัน) เป็นฟ้าผ่าลบ 2,721 ครั้ง คิดเป็น 97.6 % และเป็นฟ้าผ่าบวก 68 ครั้ง คิดเป็น 2.4 % ในจำนวนนี้มีฟ้าผ่าซ้ำขั้วลบสูงถึง 14 ครั้ง (เกิดขึ้น 1 ครั้ง) จำนวนซ้ำ 2 ครั้ง คิดเป็น 20% ของฟ้าผ่าลบทั้งหมด และฟ้าผ่าซ้ำขั้วบวกมีเพียง 2 ครั้งหรือคิดเป็น 15 % ของจำนวนฟ้าผ่าบวกทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2-5




รูปที่ 2-4 ฮีสโตแกรมจำนวนฟ้าผ่าซ้ำสู่พื้นโลกของประเทศไทย
ในปี 2539 แยกเป็นขั้วลบและขั้วบวก

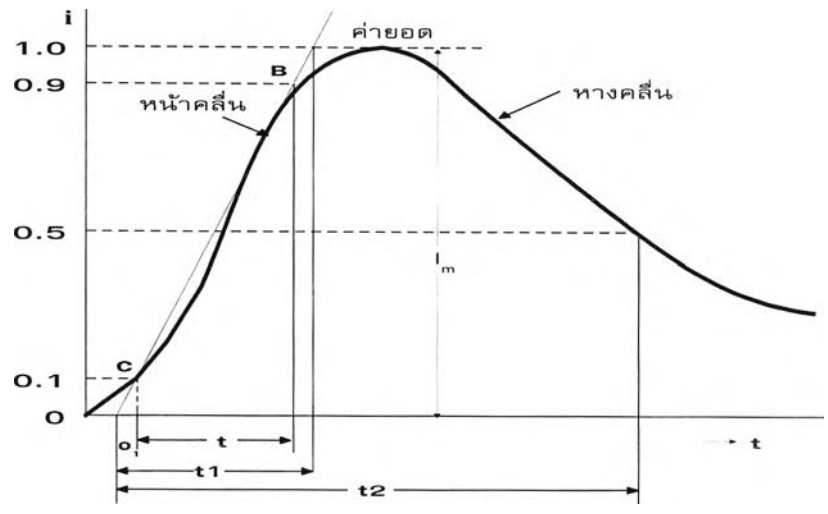



รูปที่ 2-5 จำนวนฟ้าผ่าซ้ำขั้วลบขั้วบวกซึ่งนับด้วยเครื่องนับฟ้าผ่าซ้ำ

## 2.2 หลักการสร้างกระแสอิมพัลส์

### 2.2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เป็นที่ทราบแล้วว่า ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุหรือดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกเป็นลำแสงจ้า เรียกว่า ลำฟ้าผ่า (Main Stroke) และมีกระแสมากมายไหลผ่านตามลำฟ้าผ่านี้ในช่วงระยะเวลาอันสั้นเรียกว่า กระแสฟ้าผ่า ซึ่งจะมีขนาดเป็น kA โดยปกติแล้วจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20-30 kA โดยอาจจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้ ลักษณะกระแสอิมพัลส์ที่ใช้จำลองรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าตามที่มาตรฐาน IEC 60-1 [2] ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2-6




รูปที่ 2-6 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1

โดยทั่วไปกระแสอิมพัลส์กำหนดด้วย

1) ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ($I_m$)

2) เวลาหน้าคลื่น ($t_1$) หมายถึง ช่วงเวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์ จนถึงค่ายอด

3) เวลาหางคลื่น ($t_2$) หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่กระแสเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

4) ขั้วของรูปคลื่นซึ่งจะเป็นบวกหรือลบก็ได้

การเรียกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จะเรียก โดยดูจากเวลาหน้าคลื่น/เวลาหลังคลื่น คือ $t_1$ / $t_2$ มาตรฐาน IEC. Publ.No. 60-1 [2] แบ่งชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC. Publ.No. 60-1

| ชนิด | เวลาหน้าคลื่น ($t_1$) μs | เวลาหางคลื่น ($t_2$) μs |
|---|---|---|
| 4/10 | 4 | 10 |
| 8/20 | 8 | 20 |
| 30/80 | 30 | 80 |

รายละเอียดของค่าต่างๆ ที่อยู่ในขอบเขตที่มาตรฐาน IEC. Publ.No. 60-1 ยอมรับ

1) การวัดค่าหน้าคลื่น ($t_1$) ให้คำนวณจาก 1.25 เท่า ของเวลาในช่วงที่อิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ไปจนถึง 90% ของค่ายอด

2) จุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์ ($O_1$) คือจุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% และ 90% ของค่ายอด ที่หน้าคลื่น

3) การวัดค่าเวลาหางคลื่น ($t_2$) ให้คำนวณจากเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นอิมพัลส์ ถึงเมื่ออิมพัลส์ลดค่าลงสู่ค่าครึ่งหนึ่งของค่ายอดเป็นครั้งแรก

ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะสร้างกระแสอิมพัลส์ให้มีรูปคลื่น $t_1$ /$t_2$ ได้ 8/20 μs พอดีหรือขนาดกระแสได้แม่นยำตามที่กำหนด มาตรฐานจึงยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง นั่นคือ มาตรฐานจะกำหนดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าให้มีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

| | |
|---|---|
| ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ($I_m$) | ± 10% |
| เวลาหน้าคลื่น ($t_1$) | ± 10% |
| เวลาหน้าคลื่น ($t_2$) | ± 10% |

| | ลักษณะรูปคลื่น | ค่าที่กำหนด |
|---|---|---|
| 1 | เวลาหน้าคลื่น $T_1$(μs) | 7.2-8.8 |
| 2 | เวลาหลังคลื่น $T_2$(μs) | 18-22 |
| 3 | ค่ายอด(%) | 90-110 |
| 4 | ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม | ไม่เกิน 20% |

ตารางที่ 2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

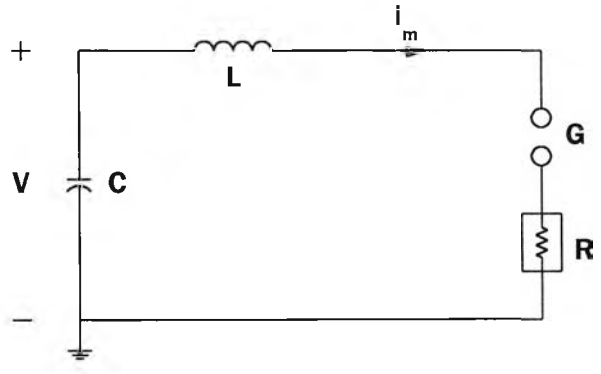
ในกรณีที่เกิดการแกว่งที่ยอดคลื่น การแกว่งที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิน 5% ของค่ายอด และรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์นี้ เมื่อกระแสกลับเข้าสู่ศูนย์แล้ว กระแสสามารถเปลี่ยนทิศของขั้วได้ แต่ในส่วนที่เปลี่ยนขั้วนี้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 20% ของค่ายอด

## 2.2.2 วงจรพื้นฐานของการสร้างกระแสอิมพัลส์

กระแสอิมพัลส์ โดยทั่วไปหมายถึงกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า เรียกรูปคลื่นดังกล่าวว่า 8/20 μs และเป็นรูปคลื่นที่ต้องการสร้างในที่นี้

กระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า สามารถสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ ตัวเก็บประจุ C จะได้รับการอัดประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร R-L ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาเพื่อให้มีรูปคลื่นตามต้องการ

วงจรที่ใช้สร้างกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไป จะใช้วงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2-7




รูปที่ 2-7 วงจรพื้นฐานในการสร้างกระแสอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

C = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงานโดยจะได้รับการอัดประจุจากแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง

L = ค่าความเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ต่างๆในวงจรทั้งหมด

G = สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุและทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์

R = ค่าความต้านทานไดนามิคของอุปกรณ์ทดสอบ และค่าความต้านทานของวงจร

การทำงานของวงจรจะมีดังนี้ คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C จะได้รับการอัดประจุจากแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการคือ V จากนั้นจะทำการจุดสปาร์กแกปด้วยสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์ (Trigger) ทำให้เกิดการคายประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ผ่านวงจรอนุกรม R-L ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามต้องการและเป็นไปตามมาตรฐาน ในทางปฏิบัติแล้วทั้งค่า L และ R เป็นค่าที่กระจายตลอดไปทั้งวงจร ซึ่งสามารถจะรู้ค่าได้จากรูปร่างของคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น ในวงจรรูปที่ 2-7 รูปคลื่นกระแส $i_m$ จะแสดงได้ดังสมการ [9] คือ

$$V = Ri_m + L\frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_m dt \qquad (2.1)$$

และ $\frac{R}{2} < \sqrt{\frac{L}{C}}$ ( underdamped)

ซึ่งจะได้ $$i_m = \frac{V}{\omega L}[\exp(-\alpha t)]\sin(\omega t) \qquad (2.2)$$

โดยที่ $\alpha = \frac{R}{2L}$ และ $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ (2.2a)

ช่วงเวลาที่กระแส $i_m$ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ จนถึงค่ายอดแรกคือ

$$T_1 = \frac{1}{\omega}\sin^{-1}\frac{\omega}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\omega}\tan^{-1}\frac{\omega}{\alpha} \qquad (2.3)$$

ระยะเวลาสำหรับครึ่งคลื่นแรกของการแกว่งแบบหน่วง $T_2$

$$T_2 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \qquad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาในสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า ค่าสูงสุดของ $i_m$ จะขึ้นอยู่กับจากค่า V และค่า C ที่สามารถจ่ายพลังงานได้ดังสมการคือ $W = \frac{1}{2}CV^2$

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs มีการกำหนดให้ $\alpha$ และ $\omega$ มีค่าดังนี้ $\alpha = 0.0535 \times 10^6$ และ $\omega = 0.113 \times 10^6$ เมื่อค่า R,L,C อยู่ในหน่วย Ω , μH และ μF ตามลำดับ ค่าผลคูณของ L กับ C จะมีค่าเท่ากับ 65 และค่าสูงสุดของ $i_m$ คำนวณได้จาก (VC)/14 โดยที่ แรงดันอัดประจุ V มีหน่วย kV และ $i_m$ มีหน่วย kA