

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและมีอิทธิพลต่อระบบจำหน่ายนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งกลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ผลกระทบจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกัน โดยปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ และเสถียรภาพในการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้า และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการใช้ชีวิตประจำวันของประชาชน

การสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟที่นับวันจะมีต้องการมากขึ้น การให้บริการพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงจึงต้องบรรลุวัตถุประสงค์ในด้านของคุณภาพ และความน่าเชื่อถือได้ โดยการไฟฟ้านครหลวงมีระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่าย ประกอบไปด้วย ระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายที่เป็นสายอากาศ และสายใต้ดิน โดยมีระดับแรงดันของสายส่งคือ 230 kV, 115 kV, และ 69 kV ในส่วนของระบบจำหน่าย จะมีระดับแรงดันของสายป้อนคือ 12 kV, 24 kV โดยส่วนใหญ่แล้ว ระบบสายส่ง และระบบจำหน่าย จะเป็นสายอากาศเหนือดิน และเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องขอบเขตทางที่จะทำการปักเสาพาดสาย มีเสาและสายไฟฟ้าเดิมอยู่ สาธารณูปโภคต่างๆ รวมทั้งกฎระเบียบข้อบังคับของเจ้าของพื้นที่ เช่น กรุงเทพมหานคร (กทม.) กรมทางหลวง (กทล.) กรมทางหลวงชนบท (กทช.) การทางพิเศษ (กทพ.) องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) เป็นต้น เพราะฉะนั้นแล้ว จึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบจำหน่ายอยู่บนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกันกับระบบส่ง โดยมีสายตัวนำในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบดินทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างสายดินเหนือศีรษะและแท่งหลักดิน เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดปรกติ หรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

ระบบสายอากาศบนดิน นับว่าโอกาสที่จะเกิดปัญหาไฟฟ้าขัดข้องนั้นมีสูงและเกิดขึ้นได้ง่าย หากเปรียบเทียบกับระบบสายใต้ดิน โดยสาเหตุของการเกิดมีหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ต้นไม้ สัตว์ อุปกรณ์ชำรุด และฟ้าผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่ง เพราะฟ้าผ่านอกจากจะทำให้เกิดความขัดข้องขึ้นในระบบไฟฟ้า ยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบอีกด้วย

การเกิดไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่านั้น โดยส่วนใหญ่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินเหนือศีรษะโดยตรง หากว่ากระแสฟ้าผ่าทำให้แรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยมากกว่าที่แรงดันที่พวงลูกถ้วยสามารถที่ทนได้ เนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามาก หรือความต้านทานของรากสายดินมีค่ามาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้แรงดันระหว่างสายเฟสของตัวนำ และสายดินเหนือศีรษะมีค่ามากกว่าแรงดันวาบไฟวิกฤต ก็จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดวาบไฟตามผิวนวนย้อนกลับ (Back flashover) โดยจะเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถภาพของระบบส่ง

2.2 ฟาผ่า

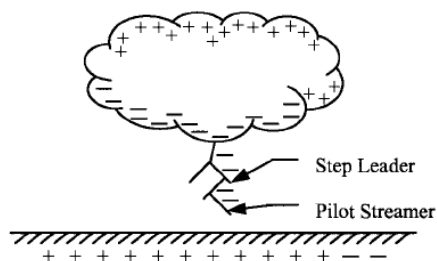
ฟาผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง สามารถสร้างความเสียหายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้กลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน โดยผลกระทบจากฟาผ่าที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบ ก่อให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกัน

ฟาผ่าเกิดขึ้นเนื่องจากการคายประจุบนหรือดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งการดิสชาร์จของฟาผ่าเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องพึ่งอิเล็กโตรด การสะสมของประจุที่มีขั้วตรงกันส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น หากประจุสะสมกันและมีปริมาณมากขึ้น และทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆ และดินมีค่าสูงมากจนอากาศแตกตัวแล้วเกิดไอออนเซชันแบบสมบูรณจากก้อนเมฆลงสู่ดิน

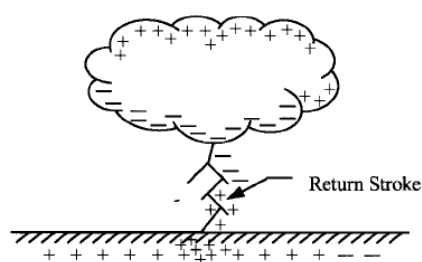
การเกิดประจุบนก้อนเมฆเกิดขึ้นเนื่องจากมีลมพัดเม็ดฝนจากด้านล่างของก้อนเมฆขึ้นไปด้านบนที่เย็นมากจนจับตัวเป็นเกล็ดน้ำแข็ง และเกิดการเสียดสีของอากาศและหยดน้ำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต โดยส่วนมากด้านล่างของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ และมีส่วนน้อยเป็นประจุบวก โดยมีค่าประมาณ 10 - 15 % โดยในส่วนที่เป็นประจุบวกนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ลมจะพัดพาขึ้นไปได้ และส่วนบนของก้อนเมฆซึ่งห่างขึ้นไปด้านบนอาจเป็น 10 กม.

การเกิดประจุที่ก้อนเมฆทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน หากสนามไฟฟ้าสูงมากเกินกว่าค่าที่อากาศทนได้ จะทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศและเปลี่ยนสภาพของอากาศจากฉนวนเป็นตัวนำ และถ้าสนามไฟฟ้าสูงมาก การเกิดแตกตัวของอากาศก็จะขยายถึงพื้นดินจนเกิดฟาผ่า

เมื่อสนามไฟฟ้าใต้ก้อนเมฆเกินกว่าที่อากาศจะทนได้ (สนามไฟฟ้าวิกฤตใต้ก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm) ก็เกิดไอออนเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละบริเวณมีความดันและอุณหภูมิของอากาศไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นการเอื้ออำนวยต่อการเกิดไอออนเซชันต่างกัน ทำให้เห็นการเกิดการแตกตัวของอากาศเป็นเหมือนรากต้นไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ด้านบนของหัวฟาผ่า เรียกว่า “ฟาผ่านำทาง” (Pilot Streamer) และแต่ละแยกของฟาผ่าเรียกว่า Step Leader ช่วงดังกล่าวประจุบนก้อนเมฆจะเคลื่อนที่ลงมาไม่รวดเร็วนัก และจะเกิดขนาดกระแสไม่กีร้อยแอมแปร์ และในช่วงนี้ยังไม่เห็นแสงหรือได้ยินเสียง โดยเมื่อฟาผ่าลงถึงพื้นดินจะเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและลบทำให้เกิดกระแสรุนแรงมีทั้งแสงและเสียง กระแสเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของประจุจากพื้นดินเพื่อขึ้นไปรวมตัวกับประจุบนก้อนเมฆ เรียกฟา “ลำฟาย้อนกลับ”



รูปที่ 2.1 อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน



รูปที่ 2.2 การเกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์.....

การเกิดฟ้าผ่าลงมาและเกิดลำฟ้าฟ้าย้อนกลับ เรียกว่า เกิดฟ้าผ่าขึ้นลงหนึ่งรอบ โดยฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป จะมีการเกิดขึ้นฟ้าผ่าขึ้นลงเฉลี่ย 2-3 รอบต่อการเกิดฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง ดังนั้นการที่เห็นฟ้าผ่าแต่ละครั้งอาจเกิดฟ้าผ่าขึ้นลง 2-3 รอบ และที่เคยวัดการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงสูงสุด ปรากฏว่ามีการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงทั้งหมด 42 รอบต่อฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง

2.2.1 ลักษณะฟ้าผ่าพื้นโลก

ลักษณะของฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะต่อไปนี้

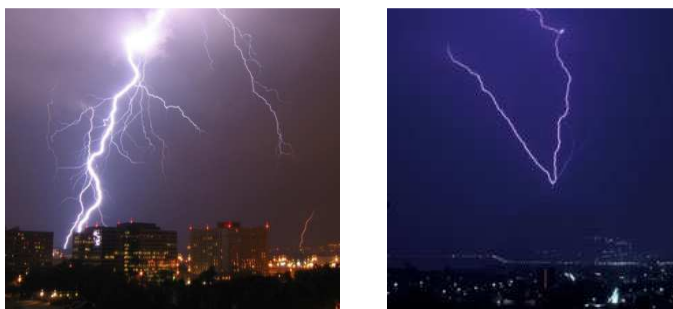
1. ฟ้าผ่าขึ้นหรือลง
2. ขั้วของกระแสฟ้าผ่า เป็นบวกหรือลบ
3. รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า
4. ขนาดของกระแสฟ้าผ่า
5. จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง

2.2.2 ฟ้าผ่าขึ้นหรือลง

ฟ้าผ่าอาจเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 กรณี ทั้งฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง หากฟ้าผ่าพื้นโลกเริ่มต้นจากก้อนเมฆที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต เกิดไอออไนเซชันของอากาศขยายตัวออกไปเป็นลีดเดอร์วิ่งสู่พื้นโลก ทำให้เกิดการดิซชาร์จประจุลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่า เรียกว่า ฟ้าผ่าลง

แต่ฟ้าผ่าเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆ ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยมากลิตเตอร์จะเริ่มต้นก่อตัวจากสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุสูงๆ ในที่พื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดที่สูงจากพื้นตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาหรือหอคอยสูง ๆ หรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง แต่กระแสฟ้าผ่าขึ้นจะมีค่าต่ำ เรียกว่า ฟ้าผ่าขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักจะเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าลง

ฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลงนั้นจะเกิดขึ้นและมีระยะเวลาที่สั้นและรวดเร็ว โดยไม่สามารถจะสังเกตแยกได้ว่าเป็นฟ้าผ่าขึ้น หรือฟ้าผ่าลง แต่อาจสังเกตดูจากลำแสงฟ้าผ่าซึ่งมีลักษณะของฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง โดยลำแสงฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลงมีลักษณะต่างกัน อธิบายได้คือ หากฟ้าผ่าลงจะมีแขนงแตกจากลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้น โลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ โดยลิตเตอร์นั้นจะกระจายทางขยายตัวลงมาหลาย ๆ ทางแล้วแต่ว่าทางใดจะเกิดโอออไนเซชันได้ง่าย ในทางกลับกันหากเป็นฟ้าผ่าขึ้นจะสังเกตเห็นการขยายตัวของแขนงขึ้นไปสู่เบื้องบน



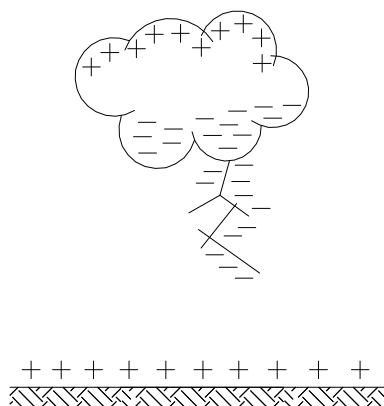
รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าขึ้น ฟ้าผ่าลง

2.2.3 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า

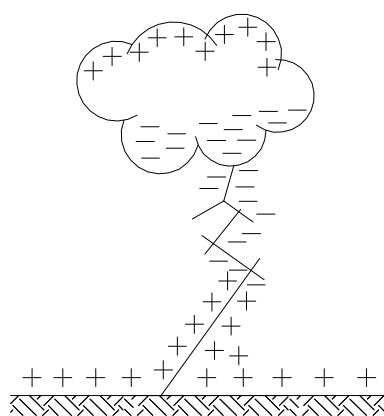
กระแสฟ้าผ่าเป็นกระแสที่ไหลทางเดียว (Unidirection) โดยอาจเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ ฉะนั้นขั้วบวกหรือลบจึงเป็นลักษณะสมบัติอย่างหนึ่งของฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าบวกหมายถึง ลำฟ้าพำนำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก กระแสฟ้าผ่าลบหมายถึง ลำฟ้าพำนำเอาประจุลบจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก

ประจุที่อยู่ส่วนล่างของก้อนเมฆมีสองกลุ่ม คือประจุบวกและประจุลบ แต่ส่วนใหญ่ 80-90 % เป็นประจุลบ ดังนั้นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากประจุลบ เรียกว่าฟ้าผ่าลบ หากการโอออไนเซชันเกิดขึ้นจากกลุ่มประจุบวกใต้ก้อนเมฆฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น เรียกว่า ฟ้าผ่าบวก

การเกิดโอออไนเซชันของอากาศแล้วกระจายทางลงมาเป็นขั้น ๆ (Stepped Leader) ลงมาถึงพื้นโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุลบจากก้อนเมฆ และประจุบวกที่พื้นโลก เป็นผลให้เกิดแสง สี เสียง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การเคลื่อนตัวของประจุดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดกระแสที่มีขนาด 200-300 แอมป์ แต่การรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุดังแสดงในรูป 2.5 ทำให้เกิดกระแสสูงมากอย่างน้อย 1 - 2 หมื่นแอมป์ ฟ้าผ่าที่เริ่มจากประจุลบดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 เรียกว่า ฟ้าผ่าลบ



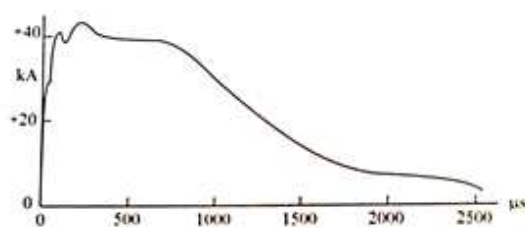
รูปที่ 2.4 การเกิดไอออนไนเซชันจากก้อนเมฆ



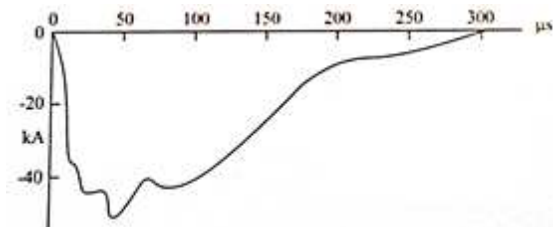
รูปที่ 2.5 การเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและประจุลบ

2.2.4 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวกและลบ มีลักษณะตามรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



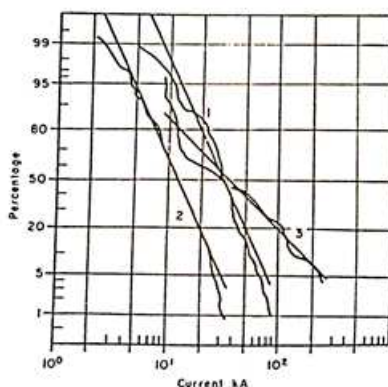
รูปที่ 2.6 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลบ

2.2.5 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

ขนาดกระแสฟ้าผ่า หมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นฟ้าผ่าโดยจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าเป็นฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง ปริมาณของประจุที่ติดสสารจ ขั้วบวกหรือขั้วลบ จากการบันทึกพบว่า กระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมแปร์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมแปร์ ในรูปที่ 2.8 แสดงถึงสถิติกระจายของกระแสฟ้าผ่าที่วัดได้จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ภาคใต้ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ระหว่างปี 1963 ถึง 1971 จากเส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเฉลี่ย (ที่ความน่าจะเป็น 50 %) ขั้วลบประมาณ 30 กิโลแอมป์ สำหรับฟ้าผ่าลำแรก และลำฟ้าผ่าตามขั้วลบประมาณ 12 กิโลแอมป์ และโดยเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกประมาณ 35 กิโลแอมป์



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสถิติของกระแสฟ้าผ่า

ลำฟ้าผ่าแรกขั้วลบ (ค่าที่ 50 % = 30 kA)

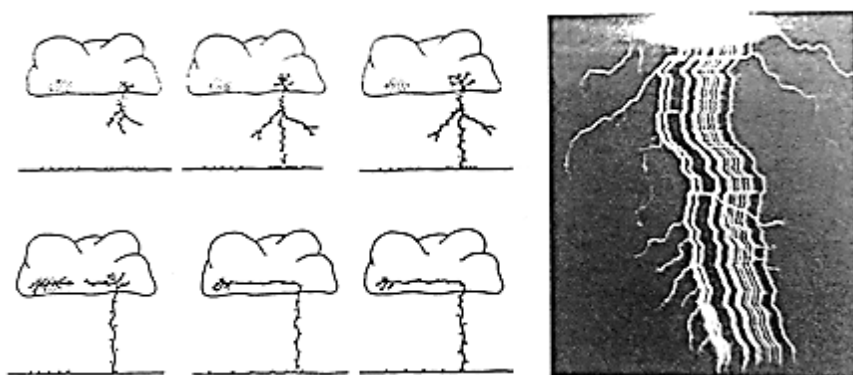
ลำฟ้าผ่าตามขั้วลบ (ค่าที่ 50 % = 12 kA)

ลำฟ้าผ่าขั้วบวก (ค่าที่ 50 % = 35 kA)

2.2.6 จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง

หากสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่า มักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าเกิดขึ้นซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าแรกๆ ซึ่งบางทีมีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์เช่นนี้ สามารถอธิบายได้ว่า ในก้อนเมฆนั้นอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง และเมื่อประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อน ก็จะทำให้เกิดดิซชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก หลังจากกลุ่มประจุแรกดิซชาร์จไปหมดแล้ว ก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิซชาร์จลงสู่พื้นตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าอากาศในแนวลำฟ้าผ่าที่วิ่งลงมาก่อนนั้นยังคั่นตัวกลับเป็นฉนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้า

ฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมีช่วงเว้นระยะเกิดซ้ำระหว่างครั้งประมาณ 5-30 มิลลิวินาที ฟ้าผ่าตามนี้ จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจิ้งหะกั้ว (Stepped leader) เวลาช่วงหน้าคลื่นของฟ้าผ่าซ้ำนี้ จะมีความชันสูงมาก อาจถึง 120 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที ซึ่งความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรก จะมีค่าเพียง 32 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที และความชันเฉลี่ยประมาณ 12 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที จากการบันทึกพบว่าการเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายๆ ครั้ง จะมีหรือไม่มีขึ้นอยู่กับภูมิประเทศในประเทศโซนหนาว จะมีฟ้าผ่าลำเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศโซนร้อนจะมีจำนวนฟ้าผ่าซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง อย่างเช่น ในประเทศอังกฤษ จะมีฟ้าผ่าแต่ละครั้ง 1-2 ลำฟ้าผ่า ในแอฟริกาฟ้าผ่าซ้ำเฉลี่ย 4 ลำฟ้าผ่า และในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่ามีฟ้าผ่าซ้ำถึง 26 ลำต่อวาบฟ้าผ่า 1 ครั้ง ดังอย่างภาพถ่ายลำฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดลำฟ้าผ่าซ้ำ

2.2.7 ผลจากฟ้าผ่า

ผลจากฟ้าผ่าสามารถก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.7.1 ผลทางความร้อน

2.2.7.2 ผลทางแรงกล

2.2.7.3 ผลทางไฟฟ้า

2.2.7.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จะสามารถสังเกตลำแสงจ้าของฟ้าผ่า โดยลำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K อุณหภูมิสูงมากขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ แม้ว่าช่วงระยะเวลาการไหลของกระแสจะสั้นรวดเร็วก็ตาม

หากฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีรอยรอยของการถูกฟ้าผ่าเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ฟ้า ที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะหลอมละลายได้ นั่นหมายถึงว่า โลหะบางทั้งหลาย มีโอกาสถูกฟ้าผ่าหลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ถ้าความหนาไม่พอ และหากเป็นถึงโลหะที่เก็บวัสดุไวไฟ เช่น ถังน้ำมันเชื้อเพลิง อาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นตามมาได้

เพราะฉะนั้นการออกแบบสายล่อฟ้า โดยต้องใช้เสาต่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือเป็นจุดที่ให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดินเป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด และจะต้องไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นหมายความว่า สายตัวนำลงดิน จะต้องมียุณหภูมิที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ

2.2.7.2 ผลทางแรงกล

นอกจากผลของทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าแล้วนั้น ขณะเดียวกันยังเกิดแรงกลระเบิดสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ส่วนแรงกลแบบที่สองเป็นแรงระเบิด เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้อากาศรอบๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายออกไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเป็นเสียงดังสนั่นหวั่นไหว เรียกว่า ฟ้าร้องนั่นเอง

กรณีฟ้าผ่าลงบนวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีความชื้นในวัสดุนั้น น้ำหรือความชื้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้

2.2.7.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

1. การรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้า
2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง
3. แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย
4. แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ
5. อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดกับคน
6. อันตรายจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส

1. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ประการแรก ก็คือ จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ หากแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอ ก็อาจเกิดสปาร์กได้

2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสฟ้าผ่า I ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_e จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ di/dt คือ ความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ถ้าหากความต้านทานของรากสายดิน หรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า ΔU มีค่าสูง โดยอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์กด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์กด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในบริเวณนั้น

2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ เนื่องจากฟ้าผ่า และเนื่องจากสวิตชิง แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าจะมีค่าสูงมากกว่าแรงดันเกินเนื่องจากสวิตชิง ดังนั้นการออกแบบฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จึงพิจารณาจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเป็นหลัก โดยแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าแบ่งได้ 4 กรณี คือ

1. กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส
2. กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
3. กรณีฟ้าผ่าลงดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
4. กรณีฟ้าผ่าในแนวเฉียงใกล้สายส่ง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส จะทำให้เกิดแรงดันเกินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่สามารถป้องกันได้ โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายเฟส เพื่อให้ฟ้าผ่าลงสายดิน จึงทำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายดินแทน ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสแล้ว กรณีที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในสายเฟสรุนแรงที่สุด คือ กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายดิน

2.3.1 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง นั้นย่อมทำให้มีแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง เนื่องจาก ลำฟ้าผ่าเปรียบเสมือนต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแส I วิ่งในสายส่ง ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าผ่าลง มีค่าเท่ากับ $\Delta U = IZ_w / 2$ แรงดันสูง คลื่นจรรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ ได้ แรงดันเกินในสายเฟส คำนวณได้จาก

$$V_p = k \cdot V_1 \quad (2.2)$$

เมื่อ	V_p	คือ	แรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส(kV)
	V_1	คือ	แรงดันในสายดิน (Ω)
	K	คือ	Coupling Factor มีค่าประมาณ 0.2-0.3

สายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลัง โดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน หากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทาน ของรากสายดินมีค่าสูง จะทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1 และอาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้ การเกิดวาวไฟตามผิวของพวกลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับ (back flashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วย ฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิวดพร่องขึ้นในระบบ ล้วนแล้วแต่กระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดิน ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน V_1 และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส V_p ซึ่งจะมี ค่าประมาณ 20-30% ของแรงดันเกินในสายดิน แรงดันในสายดินสามารถคำนวณได้จาก

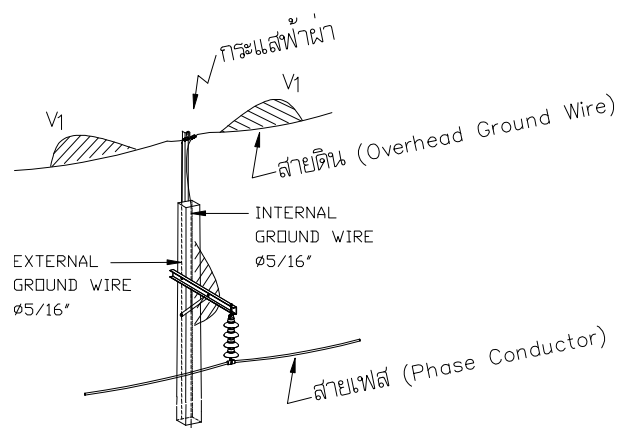
$$V_1 = Z_{total} \times I \quad (2.3)$$

เมื่อ	V_1	คือ	แรงดันในสายดิน (kV)
	Z_{total}	คือ	เสิร์จอิมพีแดนซ์รวม (Ω)
	I	คือ	กระแสฟ้าผ่า (kA)

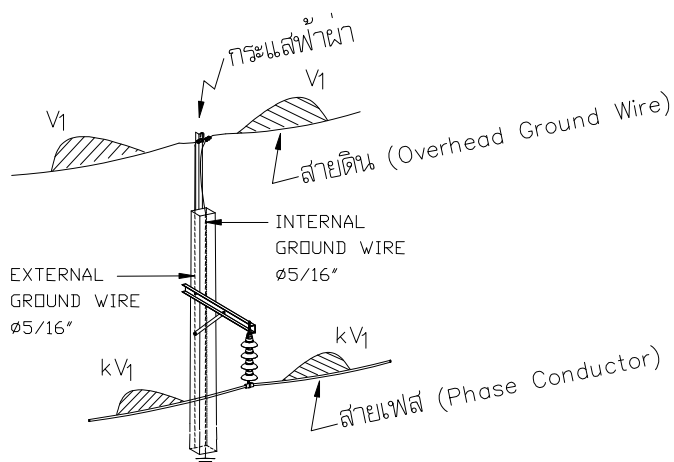
โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวม คำนวณได้จากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาขนานกัน

$$Z_{\text{total}} = \frac{Z_G \cdot Z_T}{(Z_G + 2Z_T)} \quad (2.4)$$

เมื่อ Z_G คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน (Ω)
 Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)



รูปที่ 2.10 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 kV



รูปที่ 2.11 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 kV

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวน ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และกระแสฟ้าผ่า

$$V_{ins} = V_1 - V_p = (1 - k) \cdot V_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ V_{ins} คือ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

หากพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในสายดิน และแรงดันเกินเหนี่ยวนำในสายเฟส จะทำให้เกิดวาบไปตามฉนวนของลูกถ้วยนั้นเกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งในทางปฏิบัติ ผลของการเกิดแรงดันเกินยังมีในส่วนของความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาเป็นปัจจัยหนึ่งในการส่งผลต่อการเกิดด้วย เพราะฉะนั้นจึงคำนึงถึงความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย

2.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Performance Indices)

สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (T_d) ของประเทศไทยเฉลี่ย ในพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร ช่วงปี 2536-2540 ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ T_d เท่ากับ 68 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปใช้ คำนวณค่าของความหนาแน่นของจำนวนล้าฟ้าผ่าลงสู่ดิน (Ground Flash Density (GFD): N_g) ดังสมการที่ (2.6)

$$N_g = 0.0133 T_d^{1.25} \quad (2.6)$$

เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนล้าฟ้าผ่าลงสู่ดิน (flashes/km²/yr)
 T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

ตารางที่ 2.1 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540

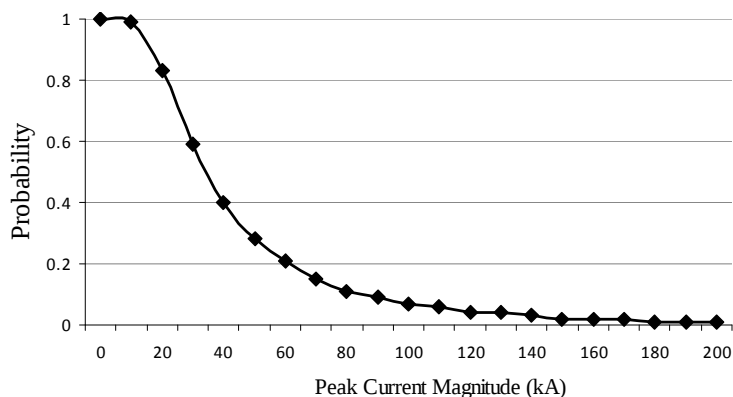
สถานีตรวจวัด	จำนวนวันฝนตกเฉลี่ยต่อปี(T_d)	ความหนาแน่นฟ้าผ่า (ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี)
กรุงเทพฯ	68	2.604
ท่าเรือคลองเตย	56	2.043
สนามบินดอนเมือง	55	1.997

ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด โดยข้อมูลเหล่านี้ค่าที่ได้เป็นไปตามพื้นที่และวิธีการตรวจวัด แต่สามารถแสดงในรูปสมการอย่างง่ายของขนาดกระแสฟ้าผ่าได้ จากการวัดในภาคสนามเกินกว่ากระแสค่ายอด สำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งการกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย เป็นไปตามรูปที่ 2.12 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ได้ดังนี้

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{M}\right)^B\right)} \quad (2.7)$$

เมื่อ	P (I)	คือ	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%)
	I	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)
	M	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ามัธยฐานเท่ากับ 34.4 kA
	B	คือ	ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5

จากสมการที่ 2.7 เมื่อนำมาแสดงในรูปกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย

การเกิดฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่จะใช้ในการคำนวณอัตราความล้มเหลวในระบบไฟฟ้ากำลัง สายส่งและสายป้อน สามารถป้องกันการถูกฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการติดตั้งสายล่อฟ้าเหนือสายเฟส เพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่า ในทางปฏิบัติ มุมป้องกันจะใช้ที่ 30 องศา สำหรับทาวเวอร์ที่มีความสูง 30 เมตรขึ้นไป มุมนี้เป็นมุมป้องกัน ถึงแม้การออกแบบการประสานสัมพันธ์ทางฉนวนสำหรับสายส่งและสายป้อนอากาศในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวง จะทำตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ลูกถ้วยต้องสามารถทนแรงดันเนื่องจากฟ้าผ่าได้ กระแสสูงสุดที่ลูกถ้วยจะสามารถทนได้ ก่อนที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ถูกเรียกว่ากระแสวิกฤต สำหรับอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ถูกคำนวณจากสมการที่ (2.11) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

2.4.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (Total Flashover Rate: TFOR)

2.4.1.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินซึ่งในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินซึ่งในอากาศ ได้จากผลรวมของสองส่วน คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (Direct Lightning Failure Flashover Rate: DLFFOR) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิว ที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate: ILFFOR) โดย TFOR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.8)

$$TFOR = DLFFOR + ILFFOR \quad (2.8)$$

เมื่อ	TFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	DLFFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	ILFFOR	คือ	การเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

2.4.1.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ ได้จากผลรวมของสามส่วน คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งในอากาศ ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR) อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟส ซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR) อัตราการเกิดวาบไฟตามผิว ที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate: ILFFOR) และ TFOR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.9)

$$TFOR = BFOR + SFFOR + ILFFOR \quad (2.9)$$

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 SFFOR คือ อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟส ซึ่งเกิดจากความ
 ล้มเหลวของสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

แต่เนื่องจากค่าอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลง
 ดินใกล้แนวสายส่งในสมการที่ (2.9) นั้น โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดทิ้งได้ดังนั้นสมการที่
 (2.9) จะลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.10)

$$TFOR = BFOR + SFFOR \quad (2.10)$$

2.4.2 อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วน
 หนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิด
 การหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน (V_1) และเกิด
 เหนี่ยวนำในสายเฟส (V_p) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อม
 พวงฉนวนลูกถ้วย เกิดขึ้นตามสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวนนี้ ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน
 ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และค่ากระแสฟ้าผ่า

ถ้าแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าความ
 คงทนของฉนวนลูกถ้วย จะทำให้เกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของฉนวนลูกถ้วย และ
 อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมา ซึ่งในทางปฏิบัติ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทาน
 ดิน และระยะห่างระหว่างเสาดัวย สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ
 จะเป็นตามสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$BFOR = P(I \geq I_c) \times N_l \quad (2.11)$$

$$N_l = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 $P(I \geq I_c)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)
 h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
 N_l คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 b คือ ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)

2.4.3 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR)

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12) โดยประกอบไปด้วย จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน คูณกับผลคูณของความน่าจะเป็นสะสม ที่กระแสฟ้าผ่า I น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤตและความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

$$SFFOR = N_f \times P(I \leq I_p) \times P(I > I_c) \quad 2.13$$

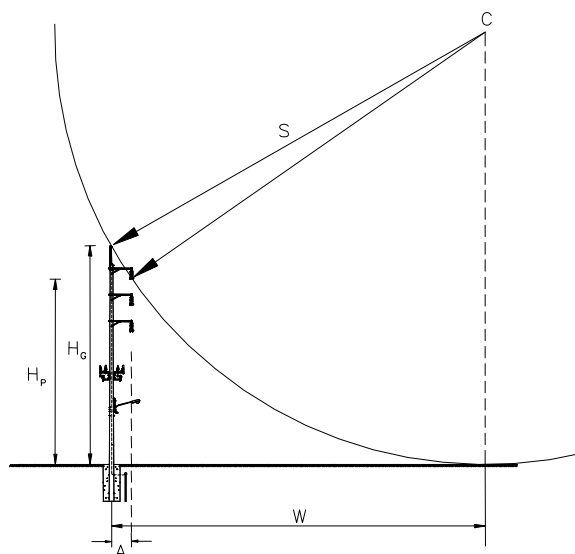
เมื่อ	SFFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิว เนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	$P(I \leq I_p)$	คือ	ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต
	h	คือ	ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
	b	คือ	ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)

2.4.3.1 การป้องกันสายเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective Shielding)

การพิจารณาว่า สายดินป้องกันสามารถรับฟ้าผ่าได้หรือไม่นั้น อาจจะพิจารณาจากรูปแบบการติดตั้งสายดินป้องกันและสายเฟส สัมพันธ์กับระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 รูปวงกลมในรูป จะมีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าสูง ระยะฟ้าผ่าก็จะมีค่ามาก ดังนั้น เมื่อเขียนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ให่วงกลมสัมผัสกับดินและผ่านสายดิน ถ้าสายเฟสอยู่นอกวงกลม แสดงว่าไม่ถูกฟ้าผ่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สายดินสามารถป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงสายเฟสได้ ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ระยะฟ้าผ่าก็มีค่าน้อย ขนาดรัศมีวงกลมก็มีค่าน้อย ทำให้โอกาสที่สายเฟสอยู่ในวงกลมมีมาก นั่นคือ แม้มีสายดินอยู่ด้านบนแล้ว ยังมีโอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าด้วยกระแสที่พิจารณาองสายเฟสได้

กระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าวิกฤต (VCFO) ที่จะทำให้อนวนเกิดวาบไฟที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบนั้น เรียกว่า กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 2.14 คำนวณหารัศมีวงกลมที่สัมผัสดิน และผ่านทั้งสายเฟสและสายดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และหากระแสฟ้าผ่าที่มีระยะฟ้าผ่าดังกล่าวได้ ตามสมการที่ 2.16

ด้วยรูปแบบของเสาการจัดเรียงสายเฟสและสายดิน ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างระหว่างสายดินและศูนย์กลางของทรงกลมกลิ้ง



รูปที่ 2.13 ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างการกระจายและจุดศูนย์กลางทรงกลมกลิ้งที่จุด C

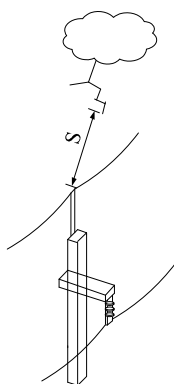
$$S = \frac{1}{2} \left[H_G + H_P + A \left(\frac{2W - A}{H_G - H_P} \right) \right] \quad (2.14)$$

$$W = \frac{H_G A + \sqrt{H_G H_P \left(A^2 + (H_G - H_P)^2 \right)}}{H_G - H_P} \quad (2.15)$$

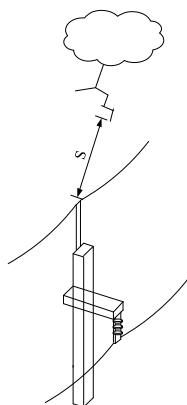
- เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส (เมตร)
W คือ ระยะห่างระหว่างสายดินและจุดศูนย์กลางทรงกลมกลิ้ง (เมตร)
H_G คือ ความสูงของสายดิน (เมตร)
H_P คือ ความสูงของสายเฟส (เมตร)
A คือ ระยะห่างระหว่างสายดินกับสายเฟสตามแนวระดับ (เมตร)
S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส (เมตร)

2.4.3.2 ระยะฟ้าผ่า

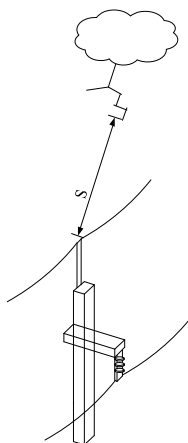
ระยะฟ้าผ่า หมายถึง ระยะทางระหว่างลำฟ้านำทาง และจุดที่ภาคพื้นดินหรือวัตถุอื่นๆ เริ่มเกิดดิสชาร์จ แสดงในรูปที่ 2.13 ถึง 2.15 ระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุบนก้อนเมฆหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งคือขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่า รูปที่ 2.13 แสดงระยะฟ้าผ่าเป็นระยะระหว่างลำฟ้านำทางและเสาส่ง ปกติฟ้าผ่าจะลงมาจากก้อนเมฆโดยยังไม่ทราบว่าจะลงตรงจุดใดที่พื้นดิน แต่จะเกิดดิสชาร์จและเคลื่อนที่ลงตามทางมาเรื่อยๆ เมื่อลำฟ้าผ่าใกล้พื้นดิน และจะเริ่มดิสชาร์จที่ภาคพื้นดินเนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่น จึงจะทราบว่าฟ้าผ่าลงที่จุดใด รูปที่ 2.14 แสดงระยะฟ้าผ่าสั้นเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีน้อย ลำฟ้านำทางจึงเคลื่อนที่ลงมาจนเข้าใกล้ภาคพื้นดินจึงเริ่มเกิดดิสชาร์จที่หัวเสา ระยะ S1 ในรูปนี้มีค่าน้อยเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆที่มีค่าน้อยหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งได้ว่า กระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ รูปที่ 2.15 ระยะฟ้าผ่ามากเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีค่ามาก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ภาคพื้นดินได้ง่ายกว่าจะเห็นได้จาก S2 ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ระยะฟ้าผ่า



รูปที่ 2.15 ระยะฟ้าผ่าสั้น



รูปที่ 2.16 ระยะฟ้าผ่ายาว

โดยทั่วไประยะฟ้าผ่านั้น อยู่ระหว่าง 20 เมตร ถึง 200 เมตร โดยระยะฟ้าผ่าสามารถนำมาหาค่ากระแสฟ้าผ่าที่ต่ำที่สุดที่สายดินสามารถป้องกันสายเฟสได้ โดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.16)

$$S = F \times I_p^b \quad (2.16)$$

เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่า (เมตร)
 I_p คือ ระยะห่างระหว่างสายดินและจุดศูนย์กลางทรงกลมกลิ้ง (เมตร)
 F, b คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบหรือการทดลองภาคสนามของนักวิจัย

2.5 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้เช่นกัน แรงดันดังกล่าวนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่ก็อาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือน อาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เพราะอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจำพวกนี้มีค่าการฉนวนที่ต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบบๆ กิโลโวลต์ได้ โดยเฉพาะอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ยิ่งมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างยิ่งย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

2.6 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คน

ตามธรรมชาติโดยมากแล้วฟ้าผ่าจะผ่าลงสู่ที่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสที่จะเป็นไปได้หากไปยืนในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสฟ้าผ่าได้โดยสะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้ที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.7 อันตรายจากแรงดันช่วงก๊าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ ซึ่งอันตรายจากฟ้าผ่านอกเหนือจะได้รับจากฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังสามารถได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงก๊าว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายจากแรงดันช่วงก๊าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีค่าความต้านทาน เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดมีระยะห่างเท่ากับช่วงก๊าวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่า แรงดันช่วงก๊าว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่รากสายดิน ที่คนมีโอกาสไปสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่ แรงดันช่วงก๊าวและแรงดันสัมผัสจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงก๊าวหรือแรงดันสัมผัสนั้น ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายเกินขีดกระแสอันตรายหรือไม่

2.8 หลักการฟ้าผ่าลงที่ตำแหน่งใด

เมื่อเกิดฟ้าผ่า ถ้าฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่หวนนำร่องได้รุกรายทางไว้ ด้วยการเกิดแตกตัวของอากาศ และหวนนำร่องเคลื่อนที่เป็นจิ้งหะก๊าวเข้าใกล้พื้นโลก จนถึงระยะหนึ่งจะทำให้เกิดสตรีมเมอร์จากวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างบนพื้นโลก มีแนวและทิศทางเข้าหาหวนนำร่องที่วิ่งลงมา เป็นการชักจูงหรือล่อให้หวนนำร่องวิ่งเข้าหา ระยะห่างช่วงสุดท้ายที่หวนนำร่องถูกล่อหรือชักจูงได้ด้วยลักษณะของวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดิน จนทำให้เกิดฟ้าผ่าลง ณ จุดนั้น คือ ฟ้าผ่าจะผ่าลงจุดที่ใกล้ที่สุดเมื่อหวนนำร่องมาอยู่ในระยะฟ้าผ่า จึงกล่าวได้ว่า ฟ้าผ่าจะผ่าลงจุดใดขึ้นอยู่กับระยะฟ้าผ่า หรือขนาดกระแสฟ้าผ่านั่นเอง