فصل هفتم

کرونا[1]

۷-۱- مقدّمه

در این فصل با پدیدهٔ کرونا، که بر اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی و بیشتر در اطراف خطوط فشار قوی رخ می‌دهد، آشنا می‌شویم. این پدیده با توجّه به عوامل و شرایط محیطی و ساختمانی، به‌صورت‌های مرئی و نامرئی ظاهر می‌شود.

کرونا که هاله‌ای نورانی است در اطراف هادی‌های فشار قوی می‌تواند به چند رنگ مختلف دیده شود (بنفش کم‌رنگ، بنفش پررنگ، آبی و ...). شکل (۷-۱) کرونای ایجاد شده در یک جداکننده (سکسیونر) را نشان می‌دهد. تشکیل کرونا در اطراف هادی‌ها و یا وسایل فشار قوی، متناظر با تلف نمودن مقداری انرژی است که معمولاً مقدار آن خیلی زیاد نیست؛ زیرا پدیدهٔ کرونا همراه با نور و حرارت است. البتّه شناخت عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا، خود دارای اهمیّت ویژه‌ای است که در این فصل آن‌ها را بررسی می‌کنیم. همچنین، قصد داریم تا با شناخت و بررسی عوامل مؤثّر بر این پدیده، از بروز آن در نواحی و مناطق مختلف جلوگیری کرده، مقدار تلفات ناشی از آن را کاهش دهیم. البتّه باید ذکر نمود که این پدیده، علاوه بر این که دارای معایبی است، مزایایی را نیز به‌همراه دارد که در انتهای این فصل به آن‌ها اشاره شده است.

1- Corona

$$E_r = E_{max} = \frac{V_r}{\ln\frac{d}{r}}\frac{1}{r} \qquad (۶-۷)$$

در شرایط هوای معمولی کنار سطح دریا، در شرایط جوّی استاندارد و بدون آلودگی، شدّت میدان لازم برای یونیزاسیون هوا روی سطح هادی صاف و صیقلی، حدود ۳۰kV/cm است. حال اگر E_r (شدّت میدان حدّاکثر بین دو هادی خطّ انتقال) به این مقدار برسد، روی سطح هادی، کرونا یعنی یونیزاسیون هوای اطراف سطح هادی اتّفاق می‌افتد. ولتاژ لازم برای ایجاد شدّت میدان از رابطهٔ (۶-۷) به‌دست می‌آید و به آن، ولتاژ بحرانی شروع کرونا می‌گویند. با توجّه به آنکه این کرونا فقط روی سطح هادی اتّفاق می‌افتد، هالهٔ بنفش رنگ آن قابل رؤیت نیست و فقط صدای جرقّهٔ آن همراه با بوی گاز ازن قابل تشخیص است که به آن، "کرونای نامرئی" گفته می‌شود

و ولتاژ لازم برای ایجاد آنرا ولتاژ بحرانی شکست می گویند(صفحه ی بعد).....

ولتاژ لازم برای ایجاد آن را "ولتاژ بحرانی شکست"[1] (V_d) می‌گویند.

اگر شدّت میدان لازم برای شروع یونیزاسیون مؤثّر هوا را E_c بنامیم، آنگاه،

$$V_d = E_c \cdot r \cdot \ln\frac{d}{r}$$

در این رابطه، d فاصلهٔ هادی‌ها و r شعاع هادی می‌باشد.

اگر E_c=۳۰kV/cm باشد آنگاه،

$$V_d = ۳۰ \times r \cdot \ln\frac{d}{r} \qquad (۷-۷)$$

البتّه این مقدار، حدّاکثر ولتاژ V_d نسبت به صفحهٔ خنثی است. برای یک خطّ دو سیمهٔ تک فاز، حدّاکثر ولتاژ خط، باید دو برابر مقدار مذکور باشد تا کرونای غیرمرئی اتّفاق بیفتد و مقدار مؤثّر آن، $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ برابر می‌شود.

مثال (۷-۱): یک خطّ انتقال تک فاز دو سیمه مفروض است که قطر هادی‌های خط، ۲۰ میلیمتر و فاصلهٔ بین آن‌ها ۴ متر می‌باشد. همچنین شدّت میدان بحرانی یونیزاسیون مؤثّر هوا در شرایط معمولی ۳۰kV/cm می‌باشد و خطّ انتقال هم در شرایط معمولی قرار گرفته است. در این حالت، ولتاژ خطّ انتقال باید چقدر باشد تا کرونای غیرمرئی اتّفاق بیفتد.

حل: با توجّه به اطّلاعات خط، داریم:

$$۲r = ۲۰\ \text{mm} \Rightarrow r = ۱\text{cm}$$

$$V_d = ۳۰ \times ۱ \times \ln\frac{۴ \times ۱۰۰}{۱} = ۱۷۹/۷۵\ \text{kV}$$

این ولتاژ، بیانگر دامنهٔ حدّاکثر ولتاژ هر هادی نسبت به صفحهٔ خنثی می‌باشد. برای این خطّ تک‌فاز دو سیمه، ولتاژ مؤثّر خط برای شروع کرونای غیرمرئی برابر است با:

$$V_d = \frac{۲ \times ۱۷۹/۷۵}{\sqrt{۲}} = ۲۵۴/۲\text{kV}$$

به این ولتاژ، ولتاژ شروع کرونای غیرمرئی (یا ولتاژ بحرانی شکست) می‌گویند.

شدّت میدان بحرانی شکست هوا، متناسب با فشار بوده و با عکس درجه حرارت متناسب است؛ و مقدار آن در دمای t=۲۰°C، فشار P=۷۶۰mmHg، و

1- Disruptive Critical Voltage

رطوبت $11 gr/m^3$ ، $30 kV/cm$ است. در ولتاژ سینوسی AC مقدار مؤثر آن $\frac{30}{\sqrt{2}}=21/21 kV/cm$ می‌شود.

با در نظر گرفتن چگالی هوا در هر شرایط دیگری، با در نظر گرفتن فشار و درجه حرارت معیّن می‌توان میدان بحرانی شکست هوا را به‌دست آورد. طبق قانون گازها برای یک گاز داریم:

$$P_1 V_1 = N_1 R T_1$$
$$P_2 V_2 = N_2 R T_2$$

که در این رابطه، P فشار گاز، T دمای گاز، V حجم گاز، N تعداد مولکول‌های گاز، و R ثابت عمومی گازها می‌باشد. چون حجم همواره ثابت است، ولی فشار و دمای هوا تغییر می‌کند، پس:

$$P_1 V = N_1 R T_1$$
$$P_2 V = N_2 R T_2$$

در نتیجه، چگالی نسبی هوا برابر است با،

$$\delta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \qquad (۸-۷)$$

در فشار و دمای متفاوت، چگالی مولکولی هوا تغییر کرده و در نتیجه، شدّت میدان لازم برای شکست آن تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال اگر فشار $P_1=760 mmHg$ و درجه حرارت برابر $T_1=20^\circ C$ باشد، آنگاه خواهیم داشت:

$$\delta = \frac{P_2}{760} \times \frac{293}{T_2} = \frac{0/386P}{t+273} \qquad (۹-۷)$$

برای سطوح ناصاف نیز شدّت میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز تشدید می‌شود. بنابراین، نسبت به سطوح صاف، شدّت میدان در نقاط نوک تیز با ولتاژ کم‌تری به حدّ شدّت میدان شکست هوا می‌رسد. ازاین‌رو، میدان بحرانی لازم برای سطح هادی که منجر به بروز کرونا در نقاط نوک تیز هادی می‌شوند، باز هم کاهش می‌یابد. توسّط ضریب ناهمواری سطح m، این کاهش ولتاژ اعمال می‌شود. در نتیجه، برای میدان بحرانی شکست داریم:

$$E_{c\,eff} = 21/21 \times m \cdot \delta \ \ kV/cm \qquad (۱۰-۷)$$

که مقدار m_0 برای سطوح مختلف به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

برای سطوح کاملاً هموار و صیقلی $m_0=1$

برای سطوح کثیف $m_0=0/93-0/98$

برای هادی‌های چند رشته‌ای $m_0=0/85-0/9$

همچنین ولتاژ مؤثّر کرونای نامرئی برای یک هادی نسبت به صفحهٔ خنثی برابر است با:

$$V_{d\,eff}=21/21\times m_0\, r\,\delta\,\ln\frac{d}{r}\ \text{kV} \qquad (7-11)$$

حال اگر ولتاژ خط به‌مقدار بحرانی ولتاژ شکست مذکور برسد، یونیزاسیون هوای روی سطح هادی شروع می‌شود؛ ولی کرونا قابل رؤیت نخواهد بود.

۷-۳-۱- ولتاژ بحرانی کرونای قابل‌رؤیت[1]

تجربه نشان داده است که اگر شدّت میدان الکتریکی در فاصلهٔ $r+0/3\sqrt{r}$ از مرکز هادی به حدّ شدّت میدان شکست هوا برسد، و در حقیقت حجم هوا در فاصلهٔ $0/3\sqrt{r}$ روی سطح هادی یونیزه شود، کرونا قابل رؤیت خواهد بود. بنابراین، لازم است شدّت میدان روی سطح هادی، بیشتر از شدّت میدان شکست هوا باشد و این نیاز به ولتاژ بالاتری خواهد داشت که ولتاژ لازم را ولتاژ کرونای قابل رؤیت می‌نامند. طبق رابطهٔ تجربی پیک[2]، برای مشاهدهٔ کرونا، شدّت میدان روی سطح هادی باید به‌مقدار $E=E_c\delta(1+\frac{0/3}{\sqrt{r\delta}})$ رسیده باشد. در نتیجه، ولتاژ کرونای قابل رؤیت با احتساب ضریب ناصافی سطح m_v، برابر است با:

$$V_v=E_c\, m_v\,(r\delta+0/3\times\sqrt{r\delta})\ln\frac{d}{r}$$

با احتساب $E_c=30\,\text{kV/cm}$، می‌توان نوشت:

$$V_v=30\, m_v\,(r\delta+0/3\times\sqrt{r\delta})\ln\frac{d}{r}$$

آنگاه ولتاژ بحرانی مؤثّر کرونای مرئی برابر است با:

$$V_{v\ eff}=21/21\, m_v\,(\delta r+0/3\times\sqrt{\delta r})\ln\frac{d}{r}\quad\text{kV}$$

1- *Visual Critical Voltage* 2- *Peek Formula*

در نتیجه،

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_v\, \delta r \left(۱ + \frac{۰/۳}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln\frac{d}{r} \quad \text{kV} \qquad (۷-۱۲)$$

مقدار m_v، بیانگر ضریب ناهمواری سطح است که برای هادی‌های چند رشته‌ای و برای کرونای موضعی[1] در نقاط برجسته تقریباً برابر $m_v = ۰/۷۲$ می‌باشد. همچنین مقدار این ضریب برای هادی‌های چند رشته‌ای و برای کرونای کلّی[2] در همهٔ نقاط، معمولاً برابر $m_v = ۰/۸۲$ است.

مثال (۷-۲): برای مثال (۷-۱)، ولتاژ کرونای مرئی را محاسبه کنید.

حل: از مثال قبل داشتیم،

$$r = ۱\text{cm} \qquad d = ۴\text{m} = ۴۰۰\text{cm}$$

ولتاژ کرونا نسبت به صفحهٔ خنثی برابر است با،

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱ \times ۱\,(۱ + ۰/۳\sqrt{۱})\ln\frac{۴۰۰}{۱} = ۱۶۵/۲\ \text{kV}$$

و در نتیجه، ولتاژ خط به خطّ کرونا را به‌مقدار زیر خواهیم داشت:

$$V_v = ۲ \times ۱۶۵/۲ = ۳۳۰/۴\ \text{kV}$$

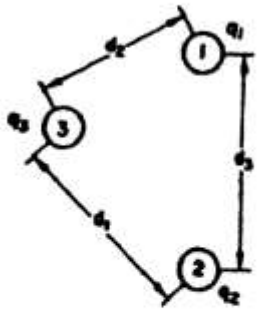
۷-۴- کرونا در خطوط انتقال سه فاز

در یک سیستم سه فاز (مطابق با شکل ۷-۶)، که شعاع هر هادی r و فاصلهٔ بین هادی‌ها، $d_۱$، $d_۲$ و $d_۳$ باشد و ولتاژ فازی (ولتاژ هر هادی نسبت به نقطهٔ خنثی یا پتانسیل صفر) V_n باشد، حدّاکثر شدّت میدان روی سطح هر هادی مشابه با خطّ تک فاز دو سیمه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$E_{max} = \frac{V}{r \ln\frac{d}{r}}$$

d فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازها می‌باشد.

1- *Local Corona* 2- *General Corona*



شکل (۷-۶): یک سیستم انتقال سه فاز

اگر $d_1=d_2=d_3$ باشد آنگاه:

$$d = d_1 = d_2 = d_3$$

اگر $d_1\neq d_2\neq d_3$ باشد آنگاه در صورت ترانسپوز شدن هادی‌ها خواهیم داشت:

$$d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} \qquad (۱۳-۷)$$

در این حالت، ولتاژ مؤثّر بحرانی شکست (کرونای نامرئی) برابر است با:

$$V_{d\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_{\cdot}\, \delta r \ln\frac{d}{r}$$

همچنین ولتاژ مؤثّر بحرانی کرونای مرئی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_v\, \delta r \left(۱+\frac{۰/۳}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln\frac{d}{r}$$

مثال (۷-۳): ولتاژ بحرانی شکست و ولتاژ بحرانی کرونای مرئی (هم کرونای موضعی و هم کرونای کلّی) را برای یک خطّ سه فاز ۲۲۰kV که قطر هادی‌ها ۲۲/۲۶mm و در رئوس یک مثلّث متساوی‌الاضلاع به ضلع ۶m قرار گرفته باشند در درجه حرارت ۲۵°C و فشار ۷۳۰mmHg محاسبه کنید. ضریب ناصافی سطح را ۰/۸۴ و برای کرونای موضعی قابل رؤیت ۰/۷۲ و برای کرونای کلّی قابل رؤیت ۰/۸۲ در نظر بگیرید.

حل:

$$r = \frac{۲۲/۲۶}{۲} = ۱۱/۱۳\text{mm} = ۱/۱۱۳\text{cm}$$

$d = ۶m = ۶۰۰cm$ ، $m_۰ = ۰/۸۴$ ، $t = ۲۵°C$ ، $P = ۷۳۰\ mmHg$

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶ \times ۷۳۰}{۲۵+۲۷۳} = ۰/۹۴۵$$

$$V_{d\ eff} = ۲۱/۲۱ \times ۰/۸۴ \times ۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳ \times \ln \frac{۶۰۰}{۱/۱۱۳} = ۱۱۷/۸۷kV$$

برای کرونای مرضعی با $m=۰/۷۲$ داریم:

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱ \times ۰/۷۲ \times ۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳ \times \left(۱۰ \frac{۰/۳}{\sqrt{۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳}} \right) \ln \frac{۶۰۰}{۱/۱۱۳}$$

$V_{v\ eff} = ۱۳۰/۵۸\ kV$ ولتاژ فازی

$V_{v\ L\text{-}L} = \sqrt{۳} \times ۱۳۰/۵۸ = ۲۲۶/۱۷\ kV$ واتاژ خط به خط

همچنین برای کرونای مرئی کلّی با $m=۰/۸۲$، خواهیم داشت:

$V_v = \frac{۱۳۰/۵۸}{۰/۷۲} \times ۰/۸۲ = ۱۴۸/۷۱\ kV$ ولتاژ فازی

$V_{v\ L\text{-}L} = \sqrt{۳} \times ۱۴۸/۷۱ = ۲۵۷/۵۸\ kV$ ولتاژ خط به خط

۷-۵- عوامل مؤثر بر کرونا

عوامل مؤثّر بر کرونا را به دو دستهٔ کلّی تقسیم می‌کنند:

۷-۵-۱- شرایط جوّی

در شرایط جوّی مختلف، شدّت میدان بحرانی برای شکست هوا متفاوت است و باعث تغییر ولتاژ کرونا در شرایط مختلف می‌شود. عوامل مؤثّر را می‌توان، چگالی هوا، میزان رطوبت، باران، طوفان و بروز صاعقه‌های شدید (که باعث ازدیاد تعداد ذرّات باردار حول خط می‌شود و شدّت میدان بحرانی را کم می‌کند) نام برد.

۷-۵-۲- شرایط هادی‌ها

عواملی که مربوط به وضعیت هادی‌ها و فاصلهٔ بین آن‌هاست و روی ولتاژ کرونا اثر می‌گذارند، عبارت است از:

الف) شعاع هادی‌ها و نسبت $\frac{d}{r}$

هرچه شعاع هادی بزرگ‌تر شود در صورتی که $d>>r$ باشد، شدّت میدان روی سطح آن کم‌تر می‌شود و غیریکنواختی میدان نیز همین‌طور می‌شود و در نتیجه، اثر کرونا کم‌تر و کرونا در ولتاژ بالاتری اتّفاق می‌افتد. وقتی هم که کرونا قشری از هوای اطراف هادی را یونیزه می‌کند، در حقیقت، آن قشر، به وضعیت هادی تبدیل می‌شود و مانند این است که شعاع هادی افزایش یافته است. در نتیجه، روی سطح جدید به شعاع r'، شدّت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و موجب جلوگیری از گسترش هالهٔ کرونا می‌شود. در واقع کرونا، عاملی برای تضعیف شدّت میدان می‌شود.

اگر نسبت $\frac{d}{r}$ خیلی کم باشد، ممکن است قبل از بروز کرونا، جرقّهٔ کامل بین دو هادی زده شود و اتّصال کوتاه به‌وجود آید. اگر $\frac{d}{r}<e$ باشد، آنگاه با افزایش مقدار r ، مقدار $\ln(d/r)$ بیشتر از میزان افزایش مقدار r، کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش شدّت میدان الکتریکی می‌شود و قبل از بروز کرونا جرقّه رخ می‌دهد. در عمل اگر $\frac{d}{r}<۱۵$ باشد، جرقّهٔ کامل قبل از کرونا رخ می‌دهد، ولی چون این نسبت همیشه برای خطوط هوایی بزرگ‌تر از ۱۵ می‌باشد، جرقّه در این شرایط رخ نمی‌دهد. همچنین اگر $\frac{d}{r}>e$ باشد با افزایش مقدار r، شدّت میدان کاهش یافته و کرونا قبل از بروز جرقّه رخ می‌دهد.

ب) نوع سطح هادی از نظر صیقلی بودن سطح

هر چقدر سطح هادی‌ها ناصاف باشد در نقاط نوک تیز، شدّت میدان قوی‌تری به‌وجود می‌آید و کرونا در آن نقاط با ولتاژ کم‌تری اتّفاق می‌افتد. هادی‌های چند رشته‌ای مانند یک سطح ناهموار عمل می‌کنند و در نقاط نوک تیز آن‌ها، کرونا با ولتاژ کم‌تری اتّفاق می‌افتد. میزان آلودگی هوا نیز بر روی ناهمواری سطح مؤثر است. درجهٔ ناهمواری سطح را با پارامتر $m_۰$ مشخّص می‌کنند. ضریب ناهمواری سطح را به‌صورت حاصلضرب دو ضریب $m_۱$ و $m_۲$ در نظر می‌گیرند.

$$m_۰ = m_۱ \times m_۲ \qquad (۱۴-۷)$$

m_1 ضریب ناهمواری سطح و m_2 ضریب شرایط آب و هوایی می‌باشد. لازم به‌ذکر است که هرچه آلودگی هوا بیشتر شود، مقدار m_2 کم‌تر می‌شود.

در ضمن، هادی‌های چند رشته‌ای نسبت به هادی‌های یکپارچه، شعاع مؤثّر کم‌تری دارند و در نتیجه شدّت میدان برای هادی‌های چند رشته‌ای بیشتر از هادی‌های یکپارچه با همان شعاع است و بالطبع، اثر کرونا تشدید می‌یابد.

ج) گروهی بودن هادی‌ها (خطوط باندل)

برای خطوط گروهی و باندل که هر فاز شامل چند هادی است، به‌جای شعاع هادی r، باید از شعاع متوسّط هندسی برای هر فاز استفاده کرد. برای خطوط باندل، اگر فاصلهٔ بین هادی‌های باندل در یک فاز برابر D و شعاع هر یک از هادی‌های باندل در یک فاز r_0 باشد، برای شعاع مؤثّر متوسّط هندسی هر فاز r خواهیم داشت:

$$r = \sqrt{r_0 D} \qquad \text{برای خطوط با هادی دوتایی} \qquad (۱۵-۷)$$

$$r = \sqrt[3]{r_0 D^2} \qquad \text{برای خطوط با هادی سه‌تایی} \qquad (۱۶-۷)$$

$$r = \sqrt[4]{\sqrt{2} r_0 D^3} \qquad \text{برای خطوط با هادی چهارتایی} \qquad (۱۷-۷)$$

بنابراین، اگر به‌جای یک هادی در هر فاز، از چند هادی به‌صورت گروه باندل دوتایی، سه‌تایی، و یا چهارتایی استفاده شود، به‌طوری که مجموع سطح مقطع هادی‌های یک گروه برابر سطح مقطع یک هادی بزرگ‌تر در هر فاز باشد، به دلیل این‌که شعاع مؤثّر متوسّط هندسی هر فاز در خطوط باندل افزایش می‌یابد، بنابراین، ظرفیت حمل جریان در آن‌ها بیشتر می‌شود. همچنین شدّت میدان الکتریکی روی سطح هادی‌های گروهی (باندل) کم‌تر شده، ولتاژ بحرانی شکست در خطوط باندل بالاتر می‌رود. به‌عنوان مثال، برای یک خطّ با باندل دوتایی، خواهیم داشت:

$$E_{max} = \frac{V\left(1 + \frac{2r_0}{D}\right)}{2r_0 \ln \frac{d}{\sqrt{r_0 D}}} \qquad (۱۸-۷)$$

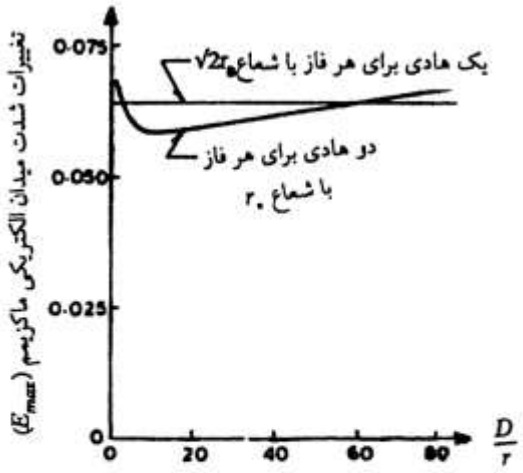
با افزایش فاصلهٔ هادی‌های باندل در یک فاز (D)، حدّاکثر شدّت میدان روی سطح هادی‌ها (E_{max}) کاهش می‌یابد؛ ولی اگر D از یک حدّی زیادتر شود، E_{max} افزایش می‌یابد (شکل ۷-۷ را ببینید). در طرّاحی خطوط انتقال باندل، فاصلهٔ بین هادی‌های باندل (D) به‌مقدار بهینه (D_{opt}) که E_{max} کم‌ترین مقدار را دارد، تنظیم می‌شود. مقدار D_{opt} از مشتق‌گیری تابع E_{max} نسبت به متغیّر D و مساوی صفر قرار دادن آن به‌دست می‌آید. در این رابطه، از اثر زمین و اثرات متقابل فازها روی تغییر شکل میدان صرف‌نظر شده است. همچنین باندل کردن، اثر قابل توجّهی در کاهش اندوکتانس خطوط دارد.

اگر از یک هادی به شعاع r و با سطح مقطع معادل باندل دوتایی استفاده کنیم، داریم:

$$\pi r^2 = 2\pi r_0^2 \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt{2}\, r_0$$

در نتیجه،

$$E_{max} = \frac{V}{\sqrt{2}\, r_0 \ln \frac{d}{\sqrt{2}\, r_0}} \qquad (۱۹-۷)$$



شکل (۷-۷): اثر تغییرات D/r روی شدّت میدان الکتریکی حدّاکثر برای یک خطّ انتقال با d/r=۷۰۰

با مقایسهٔ این رابطه با رابطهٔ (۷-۱۶) ملاحظه می‌شود که در باندل دوتایی، شدّت میدان روی سطح هادی کم‌تر بوده، ولتاژ کرونا افزایش می‌یابد (زیرا، $D>>r$ و $2>\sqrt{2}$ است).

د) گرم شدن سطح هادی‌ها

با عبور جریان از هادی، دمای سیم بالا می‌رود و شبنم‌های ریز تشکیل شده روی سطح هادی‌ها که در شرایط مه و مرطوب تشکیل می‌شوند، تبخیر می‌شود و در نتیجه، ناهمواری سطح، کاهش می‌یابد و ولتاژ کرونا افزایش می‌یابد.

۷-۶- تلفات کرونا

ذرّات باردار تولید شده که در مکان تخلیهٔ الکتریکی اطراف هادی حرکت می‌کنند، به‌وسیلهٔ پدیدهٔ کرونا حاصل می‌شوند؛ به‌سبب آنکه آن‌ها به‌وسیلهٔ میدان الکتریکی به‌حرکت درمی‌آیند. انرژی مورد نیاز توسّط بارها در جابه‌جایی که با میدان الکتریکی تغذیه می‌شود، توسّط ولتاژ درخواستی هادی و جابه‌جایی جریان در سراسر هادی تأمین می‌گردد. به‌عبارت دیگر، در اطراف هادی، اتلاف انرژی داریم. به منظور تأمین انرژی مورد نیاز خطّ انتقال، و با توجّه به این‌که انرژی اضافی مورد نیاز در اطراف هادی به‌صورت جرقّه‌های کرونا ذخیره می‌شود؛ در نتیجه، باید انرژی منبع به‌مقدار انرژی انتقالی مورد نیاز و انرژی نهفته در تخلیه‌های جزئی (جرقّه‌های کرونا)، در اطراف هادی باشد. این اتلاف قدرت اضافی همان "اتلاف کرونا" است.

در نتیجه، می‌توان گفت که تشکیل کرونا متناظر با تلف نمودن مقداری انرژی است؛ امّا مقدار آن معمولاً نسبت به تلفات اهمی، خیلی زیاد نیست؛ بنابراین، تأثیر چندانی روی تنظیم ولتاژ خط ندارد. محاسبهٔ مقدار شدّت جریان کرونا، به‌علّت این‌که نمی‌توان مقدار دقیق بار الکتریکی فضای اطراف حوزهٔ کرونا را محاسبه نمود، کاری مشکل است. از این‌رو، معمولاً از روابط تجربی که از نتایج آزمایش‌ها به‌دست آمده‌اند، برای محاسبهٔ تلفات کرونا استفاده می‌شود. اوّلین و مهم‌ترین رابطهٔ تجربی

برای تعیین تلفات کرونا، به‌وسیلهٔ یک مهندس آمریکایی به‌نام "پیک"[1] پیشنهاد شده است. این رابطه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f+۲۵)\sqrt{\frac{r}{d}}\left(V_{ph}-V_d\right)^۲ \times ۱۰^{-۵} \qquad \text{kW/km/phase}$$

(۲۰-۷)

در این رابطه،

d = فاصلهٔ بین هادی‌ها به cm،

r = شعاع هادی خط به cm،

δ = چگالی نسبی هوا،

f = فرکانس سیستم به Hz،

V_{ph} = ولتاژ فازی مؤثر خطّ انتقال به kV،

V_d = ولتاژ بحرانی شکست؛ که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_d = ۲۱/۲۱ m_. \delta r \ln\frac{d}{r} \qquad \text{kV}$$

و چگالی نسبی هوا از رابطه:

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶P}{۲۷۳+t_.}$$

در این رابطه، P فشار هوا به mmHg و $t_.$ دمای محیط به °C است. لازم به‌ذکر است که رابطهٔ پیک در شرایط زیر صادق است:

۱- فرکانس باید بین ۲۵ تا ۱۲۰ هرتز باشد؛

۲- شعاع هادی باید بزرگ‌تر از ۰/۲۵cm باشد؛

۳- این رابطه برای شرایط هوای صاف صحیح است و نباید رطوبت به‌طور غیرعادی پایین باشد؛

۴- باید نسبت $\frac{V_{ph}}{V_d} > ۱/۸$ برقرار باشد. اگر این نسبت کم‌تر از ۱/۸ باشد، آنگاه فرمول تجربی ارائه شده توسّط پترسون[2] نتیجهٔ دقیق‌تری می‌دهد.

$$P_c = \frac{۲۱ \times ۱۰^{-۶} f V_{ph}^۲}{(\log_{۱۰}\frac{d}{r})^۲} \times F \qquad \text{kW/km/phase} \qquad (۲۱-۷)$$

1- Peek 2- Peterson

V_{ph} = ولتاژ فازی خط بر حسب kV،

f = فرکانس سیستم بر حسب Hz،

d = فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازها بر حسب cm،

r = شعاع هادی بر حسب cm،

F = ضریبی است که به نسبت $\frac{V_{ph}}{V_d}$ بستگی دارد و طبق جدول (۷-۱) تعیین می‌شود.

جدول (۷-۱): تعیین مقدار ضریب F برای رابطهٔ پترسون

V_{ph}/V_d	۰/۶	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲/۰
F	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۳	۱/۰	۳/۵	۶/۰

البتّه تلفات کرونای مقره‌ها را می‌توان از همان رابطهٔ پیک محاسبه نمود.

مثال (۷-۴): در یک سیستم سه فاز ۲۲۰kV با فرکانس ۵۰Hz، خطوط با شعاع هادی ۱/۲cm در رئوس مثلث متساوی‌الاضلاع به طول ۲m قرار گرفته‌اند. تلفات کرونا در هر کیلومتر از طول خط را در شرایط نسبتاً مناسب $m_0 = ۰/۹۶$، درجهٔ حرارت هوا ۲۰°C و فشار هوا ۷۲۲mmHg محاسبه کنید.

حل: طبق رابطهٔ پیک داریم:

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f+۲۵)\sqrt{\frac{r}{d}}\left(V_{ph}-V_d\right)^۲ \times ۱۰^{-۵} \qquad \text{kW/km/phase}$$

$f = ۵۰\text{Hz}$, $r = ۱/۲\text{cm}$, $d = ۲\text{m}$, $P = ۷۲۲\ \text{mmHg}$, $t = ۲۰^\circ\text{C}$

در نتیجه، با جایگذاری مقادیر خواهیم داشت:

$$V_{ph} = \frac{۲۲۰}{\sqrt{۳}} = ۱۲۷\ \text{kV}$$

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶\,P}{۲۷۳+t} = \frac{۰/۳۸۶\times ۷۲۲}{۲۷۳+۲۰} = ۰/۹۵۱$$

$$V_d = ۲۱/۲۱\, m_0 \delta r \ln\frac{d}{r} = ۲۱/۲۱\times ۰/۹۶\times ۰/۹۵۱\times ۱/۲\times \ln\frac{۲۰۰}{۱/۲} = ۱۱۸/۸۸\ \text{kV}$$

$$P_{c\,1\phi} = \frac{۲۴۴}{۰/۹۵۱}(۵۰+۲۵)\sqrt{\frac{۱/۲}{۲۰۰}}\,(۱۲۷ - ۱۱۸/۸۸)^{۲} \times ۱۰^{-۵}$$
$$= ۰/۹۸۳ \text{ kW/km/phase}$$

$$P_{c۳\phi} = ۳\times ۰/۹۸۳ = ۲/۹۴۸ \text{ kW/km/۳ phase}$$

با استفاده از رابطهٔ پترسون داریم:

$$P_c = \frac{۲۱\times ۱۰^{-۶} \times ۵۰ \times ۱۲۷^{۲}}{(\log_{۱۰} \frac{۲۰۰}{۱/۲})^{۲}} \times ۰/۰۵۹ = ۰/۲۰۲ \text{ kW/km/۳phase}$$

$$P_{c۳\phi} = ۳\times ۰/۲۰۲ = ۰/۶۰۶ \text{ kW/km}$$

قابل ذکر است که برای سیم‌های با اندازهٔ خیلی کوچک رابطه‌های زیر، خیلی نزدیک به حقیقت است.

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f+۲۵)\sqrt{\frac{۰/۹۳}{d^{۲}} + \frac{r + ۰/۰۱۶}{d}}(V_{ph}-V_d)^{۲} \times ۱۰^{-۵} \text{ kW/km/phase} \qquad (۲۲-۷)$$

که در این رابطه، r شعاع هادی و d فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازهاست. همچنین داریم:

$$V_d = ۱۲۳ m_d \delta r \left\{ ۱ + \frac{۰/۱۸۸}{۱ + ۱۴۸۵ r^{۲}\sqrt{\delta r}} \right\} \log\frac{d}{r} \quad \text{kV/phase} \qquad (۲۳-۷)$$

۷-۶-۱- شکل تقریبی رابطهٔ پترسون برای تلفات کرونا

رابطهٔ پترسون ارائه شده در معادلهٔ (۷-۲۱)، برای استفاده در هادی‌های گروهی (باندل)، خیلی مفید نیست؛ بنابراین، شکل تقریبی رابطهٔ (۷-۲۱) را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$P_c = a\left\{ ۰/۴۵ \left(\frac{V_{ph}}{V_d}\right)^{۳} - ۰/۴ \left(\frac{V_{ph}}{V_d}\right)^{۲} \right\} \quad \text{برای } ۰/۹ \le \frac{V_{ph}}{V_d} \le ۱/۴ \qquad (۲۴-۷)$$

$$P_C = a\left\{ ۱۰/۱ \left(\frac{V_{ph}}{V_d}\right)^{۲} - ۱۳/۸۲ \left(\frac{V_{ph}}{V_d}\right)^{۲} \right\} \quad \text{برای } ۱/۴ \le \frac{V_{ph}}{V_d} \le ۲/۴ \qquad (۲۵-۷)$$

محاسبه نمود.

۷-۷- عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا

عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا عبارتند از:
۱- عوامل مربوط به فرسودگی خطوط،
۲- عوامل الکتریکی،
۳- عوامل جوّی،
۴- عوامل مربوط به هادی‌ها.

۷-۷-۱- عوامل مربوط به فرسودگی خطوط

در خطوط انتقالی که جدیداً احداث می‌شوند، تلفات کرونا در چند ماه اوّل به‌طور غیرعادی زیاد است و به‌تدریج کاهش می‌یابد تا به یک مقدار دائمی می‌رسد. علّت این امر، آن است که در مراحل کشیدن هادی‌ها، معمولاً هادی‌ها روی سطح زمین کشیده می‌شود و سطح آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای صدمه می‌بیند. بنابراین، بعد از کلیدزنی خط و برق‌دار شدن آن، اساساً کرونا روی نقاط زبر و برجستهٔ به‌وجود آمده، تشکیل می‌شود؛ ولی به‌تدریج در اثر گاز ازن تولید شده به‌وسیلهٔ کرونا، نقاط برجسته شدیداً اکسیده می‌شوند و به‌تدریج از بین می‌روند و در نتیجه، هادی هموارتر می‌شود. بنابراین، فرسودگی هادی‌های خط که تحت ولتاژاند، شرایط مساعدی را از نقطه نظر کرونا ایجاد می‌کنند.

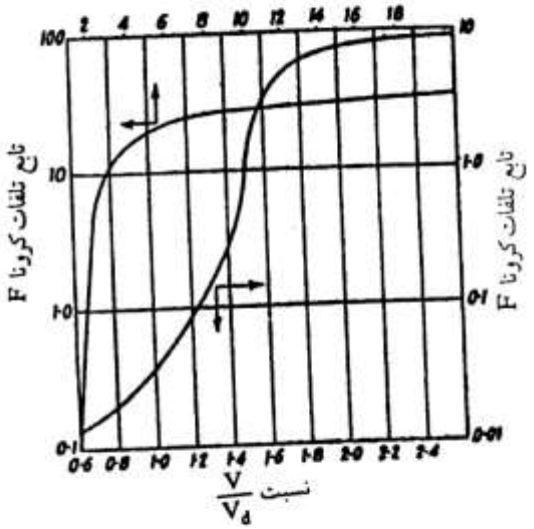
۷-۷-۲- عوامل الکتریکی مؤثّر بر تلفات کرونا

الف) فرکانس و شکل موج منبع تغذیه: تلفات کرونا مستقیماً به فرکانس بستگی دارد. هارمونیک‌های فرکانس بالا (هارمونیک سوم به بالا)، همیشه در جریان انتقالی توسّط خطوط فشار قوی وجود دارد. هارمونیک‌های فرکانس بالا، جریان کرونا و تلفات را به طور قابل توجّهی افزایش می‌دهند. بنابراین، شکل موج ولتاژ تغذیه نیز، اثر مشابهی روی تلفات کرونا دارد.

ب) شدّت میدان اطراف هادی: تلفات کرونا به‌مقدار ولتاژ و یا شدّت میدان الکتریکی اطراف هادی بستگی دارد که در شکل (۷-۸) نشان داده شده است.

بر اساس شکل (۷-۸)، تلفات کرونا در قسمت زانویی و قبل از آن، به‌تدریج زیاد می‌شود؛ امّا بعد از خمیدگی، تلفات کرونا به‌سرعت افزایش می‌یابد. تحت شرایط هوای صاف، خمیدگی منحنی تلفات کرونا در اطراف نقطهٔ ولتاژ شکست بحرانی اتّفاق می‌افتد. مقدار ولتاژ شکست بحرانی را می‌توان توسّط رابطهٔ زیر تعیین نمود:

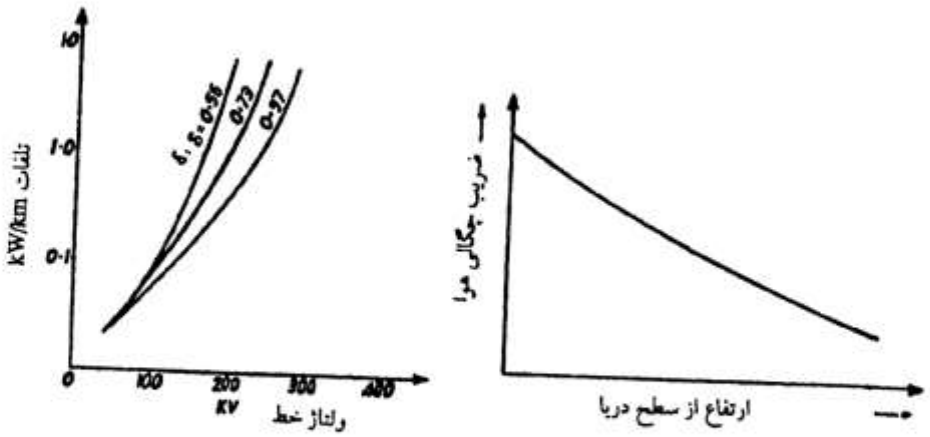
$$V_d = ۲۱/۲۱\, m.\ \delta\, r\ \ln\frac{d}{r}$$



شکل (۷-۸): تغییرات تلفات کرونا، در اطراف یک هادی

۷-۷-۳- عوامل جوّی مؤثّر بر تلفات کرونا

الف) چگالی هوا: اثر چگالی هوا در شکل‌های (۷-۹-الف) و (۷-۹-ب) نشان داده شده است. تلفات کرونا در یک خطّ انتقال عبوری از نواحی با ارتفاع زیاد، خیلی بیشتر از تلفات در یک خطّ عبوری از سطح هموار می‌باشد؛ زیرا مقدار δ در ارتفاع‌های بلند، کاهش می‌یابد.



شکل (۷-۹): اثر تغییرات چگالی هوا و تلفات کرونا؛ الف) تغییر تلفات بر حسب ولتاژ خط در چگالی‌های مختلف هوا، ب) تغییر چگالی هوا بر حسب ارتفاع از سطح دریا

ب) وضع بارش، گرد و خاک، بارش برف، تگرگ، و ...: در شرایط جوّی بارانی و مه، وقتی که ذرّات آب برای مدّتی روی سطح هادی به‌صورت قطرات می‌نشینند، نقاط برجسته‌ای روی سطح تشکیل می‌شود که باعث ایجاد ناهمواری شده، شدّت میدان در آن نقاط تشدید می‌شود؛ بنابراین، در شروع بارندگی که قسمت‌هایی از هادی خشک است این قطرات موجب ناهمواری زیاد سطح و بالا رفتن تلفات کرونا می‌شود. ولی بعد از مرطوب شدن تمام سطح، قطرات آب، سریعاً روی هادی می‌لغزند و جریان می‌یابند و فقط ناهمواری‌ها روی قسمت پایینی سطح هادی که قطرات به زمین می‌افتند، وجود دارد. بنابراین، بیشترین تلفات کرونا طی ریزش نم نم باران مشاهده می‌شود. شدّت باران و ابعاد قطرات، اثر زیادی روی مقدار تلفات می‌گذارند. این اثرات مخصوصاً برای هادی‌های با قطر بزرگ‌تر، نسبت به هادی‌های با قطر کوچک، بیشتر خواهد بود؛ زیرا در هادی‌های با قطر کوچک، شعاع قطرات باران ممکن است خیلی کوچک نباشند که بتوانند روی سطح بنشینند. ذرّات گرد و غبار هم مشابه با دلایل ارائه شده در مورد قطرات باران، می‌تواند باعث ایجاد تلفات

کرونا شوند.

۷-۷-۴- عوامل مربوط به هادی

الف) قطر هادی: با افزایش قطر هادی، شدّت میدان الکتریکی در سطح هادی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تلفات کرونا می‌شود. البتّه اثر ناصافی سطح هادی، نسبت به قطر هادی، تأثیر بیشتری در افزایش شدّت میدان دارد. بنابراین، احتمال افزایش تلفات کرونا با افزایش اندازهٔ هادی، مستقیماً با شرایط سطحی هادی مرتبط است.

ب) تعداد هادی‌های در هر فاز: با افزایش تعداد هادی‌های هر فاز (خطوط باندل)، شدّت میدان الکتریکی روی هر سیم، کاهش می‌یابد. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که با افزایش هادی‌های هر فاز، سطح مقطع جانبی هادی‌ها نسبت به استفاده از یک هادی (با همان سطح مقطع سیم)، بیشتر می‌شود. بنابراین، چگالی بار سطحی و در نتیجه، شدّت میدان روی سطح هادی، کاهش می‌یابد. بالطبع، کرونا و تلفات آن به‌مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

ج) شرایط سطحی هادی‌ها: هادی‌ها در شرایط جوّی، بدون پوشش هستند و در نتیجه، سطح هادی، خاک و آلودگی را روی خود نگه می‌دارد. ناهمواری‌های سطح هادی، دلیل اصلی زود رسیدن به ولتاژ شکست بحرانی خواهند بود. با ایجاد تخلیه‌های الکتریکی در هوا (که یک گازی ترکیبی از O_2 و N_2 است)، گازی به‌نام ازن (O_3) و اکسیدهای نیتروژن تولید می‌شود. این گازها، عناصری بی‌ثباتند و به‌راحتی قادر به اکسیداسیون عناصر هستند و اکسیژن از سطح هادی جدا می‌کنند. در مراحل اکسیداسیون هادی، ازن، اصلی‌ترین عامل است که از تخلیهٔ الکتریکی کرونا ناشی می‌شود. با انجام تخلیهٔ جزئی کرونا و اکسیداسیون، ناهمواری‌های تیز روی سطح، به‌تدریج صاف شده و ناپدید می‌شوند تا این که سطح هموار شده و تلفات کرونا کاهش یابد. کاهش تلفات کرونای ناشی از شرایط جوّی در شکل (۷-۱۰) نشان داده شده است.

۷-۸- روش عملی کاهش تلفات کرونا

تلفات کرونا بازده خطّ انتقال را کاهش می‌دهد. تلفات کرونای خیلی زیاد در شرایط بد آب و هوایی، باید به طریقی کاهش داده شوند. مطلوب‌ترین روش کاهش تلفات کرونا، افزایش قطر هادی‌ها برای کاهش ولتاژ بحرانی شکست (V_d) است؛ زیرا اثر آن از سایر عوامل دیگر، خیلی بیشتر است. معمولاً باید خطوط انتقال را طوری طرّاحی کرد که ولتاژ بحرانی شکست در شرایط جوّی عادی خط، ۱۰٪ بالاتر از ولتاژ نامی خط(ولتاژ فازی) باشد تا در هنگام شرایط بد جوّی، مقدار تلفات کرونا در حدّ پایین و رضایت‌بخش باشد. تلفات کرونا تحت شرایط خوب آب و هوایی نباید از ۰/۶kW/km بیشتر باشد.

اگر $m_0 = ۰/۸$ و $\delta = ۱$ و در خطوط انتقال با ولتاژ بالا، $\ln \frac{d}{r} = ۶$ باشد، در این صورت:

$$V_d = ۲۱/۲۱ \times ۰/۸ \times ۱ \times ۶ \times r \cong ۱۰۱r$$

اگر $V_d = ۱/۱ V_{ph}$ باشد آنگاه،

$$۱/۱ V_{ph} = ۱۰۱r \Rightarrow r \cong ۰/۰۱ V_{ph}$$

مثلاً برای یک خطّ انتقال ۴۰۰kV خواهیم داشت:

$$r = ۰/۰۱ \times \frac{۴۰۰}{\sqrt{۳}} = ۲/۳\text{cm} = ۲۳\text{mm} \Rightarrow \text{سطح مقطع هادی } A = ۱۶۷۵\text{mm}^۲$$

اگر خطّی به طور اقتصادی طرّاحی شده باشد، ولتاژ V_{ph} آن نزدیک به ولتاژ بحرانی شکست است؛ بنابراین، قطر هادی با این محاسبه برای ولتاژهای خیلی بالا، بسیار بزرگ است که چنین هادی‌هایی عملاً ساخته نمی‌شوند، زیرا نمی‌توانند قابلیّت انعطاف داشته باشند و در نتیجه، خیلی سنگین می‌شوند. در این حالت‌ها، بهترین راه حل برای کاهش تلفات کرونا استفاده از خطوط باندل است که در این روش، شعاع مؤثّر هر فاز را افزایش می‌دهد و در نتیجه، تلفات کرونا به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۷-۹- مزایا و معایب کرونا

مزیّت کرونا این است که هنگام بروز صاعقه‌های با ولتاژ بالا به خط، مانند یک شیر اطمینان عمل می‌کند و اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه به‌صورت تلفات کرونا از بین می‌رود. بنابراین، اغلب، ولتاژ خط را طوری طرّاحی می‌کنند که به ولتاژ بحرانی شکست نزدیک باشد.

از معایب کرونا، ایجاد تلفات روی خط، هر چند که مقدار آن کم و بی‌اهمّیت است، می‌باشد. همچنین در خطّ انتقال، یک جریان غیرسینوسی ایجاد می‌شود که باعث افت ولتاژ غیرسینوسی روی خط شده و در نتیجه، هارمونیک‌های سوّم و بالاتر با دامنهٔ بالا را تولید می‌کند که روی مدارهای مخابراتی نزدیک خط، پارازیت رادیویی ایجاد می‌کند.

تخلیه‌های الکتریکی کرونا، پرتوهایی را که در آوردن سیگنال‌های رادیویی در کانال‌های ارتباطی گیرنده‌های رادیو و تلویزیون مناسب‌اند، منتشر می‌کنند، این موضوع، به تداخل رادیویی معروف است. اساساً تخلیهٔ الکتریکی در فاصلهٔ هوای بین دو الکترود که ولتاژ این دو الکترود از حدّ مشخّصی تجاوز کرده باشد، به‌شکل واضحی نمایان می‌شود. تخلیه‌های الکتریکی منفی، کم‌تر برای امواج رادیویی مزاحم هستند. تداخل رادیویی فقط به عامل مسبب آن وابسته نیست و همچنین به نوع گیرندهٔ رادیویی و نوع گیرندهٔ موج (آنتن) بستگی دارد. تحقیقات به‌عمل آمده، اثرات زیر را در تداخل رادیویی بیان می‌کند:

۱- وقتی که ولتاژ به‌تدریج افزایش می‌یابد، قبل از آنکه در تلفات کرونا اثر محسوسی داشته باشد، در اغتشاشات میدان نمایان می‌شود. امّا پس از افزایش شدید ولتاژ، اغتشاشات میدان بسیار کم‌تر از تلفات کرونا، افزایش پیدا می‌کند؛

۲- اغتشاشات میدان با افزایش فاصلهٔ هادی‌ها کم می‌شود. همچنین نوسانات منتقل شده از اغتشاش میدان، در عملکرد سه فاز مستقل از نوع خط و ولتاژ آن است؛

۳- اندازهٔ میدان اغتشاشات، ارتباط معکوسی با میزان فرکانس در نقطهٔ تداخل امواج رادیویی دارد؛

۴- اغتشاشات میدان خیلی کم‌تر از تلفات کرونا، به شرایط سطحی و نوع هادی (تکی یا گروهی) وابسته می‌باشد. به‌علاوه، اغتشاشات میدان در یک هوای صاف و تمیز نسبت به یک هوای آلوده، پایین‌تر است.

تداخل امواج رادیویی بر حسب ولتاژ تداخل رادیویی (RIV[1]) به‌وسیلهٔ دستگاه اندازه‌گیری نویز رادیویی استودارت[2] اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار اندازه‌گیری به‌وسیلهٔ رابطهٔ زیر مشخّص می‌گردد:

$$\frac{RIV \text{ مقدار اندازه‌گیری شده}}{\text{KHz پهنای باند در واحد}} = \text{KHz پهنای باند}$$

محافظت در مقابل تداخل رادیویی به ناحیه‌ای که خط در آن ساخته شده است، وابسته می‌باشد. تداخل رادیویی یکی از موضوعات مهم، حتّی مهم‌تر از تلفات کرونا در تعیین کردن محدودیت‌های بهره‌برداری از یک خطّ انتقال می‌باشد. همچنین تداخل رادیویی در کرونای ایجاد شده، روی سطح مقره‌ها نیز، بروز می‌کند.

1- *Radio Influence Voltage* 2- *Stoddart*