中波放送波による送電線への誘導電界の低減 (架空地線を含む共振構造の場合)

非会員 笹 森 崇 行 (秋田県立大) 非会員 澤 谷 邦 男 (東北大)
 非会員 安 達 三 郎 (東北工大) 非会員 朝 日 道 成 (東京電力)
 正 員 有 田 高 治 (東京電力) 非会員 岡 村 信 男 (関電工)

Reduction of Induced Electric Field on Power Lines Due to Resonance of MW Broadcasting Wave

Takayuki Sasamori, Non-member (Akita Prefectural University), Kunio Sawaya, Non-member (Tohoku University), Saburo Adachi, Non-member (Tohoku Institute of Technology), Michinari Asahi, Non-member (Tokyo Electric Power Co.), Kohji Arita, Member (Tokyo Electric Power Co.), Nobuo Okamura, Non-member (Kanden Co.)

It has been pointed out that a very strong electromagnetic field is induced occasionally along aerial power lines located near a medium wave (MW) broadcasting station, and the construction and the maintenance of power lines are sometimes endangered. We have presented a method to predict a dangerous span before the construction and the maintenance, and a use of a loading of appropriate inductor to decrease the induced field the case where the resonant loop is composed of three power lines, i. e., a top conductor, a middle conductor and a bottom conductor and part of towers.

In this paper, the effect of loading inductor for the case that the resonant loop includes a ground wire is presented. Since the ground wire is connected directly to the tower, the inductor can not be loaded into the ground wire. It is shown that the field strength in the vicinity of three power lines can be suppressed by loading the inductor to three power cables each. However, the field in the vicinity of the ground wire can not be suppressed significantly. Measured values of the field strength in the vicinity of the bottom conductor is presented to confirm the suppression effect.

キーワード：モーメント法，送電線，放送波，誘導電界，インダクタ

Keywords: method of moment, power line, broadcasting wave, induced electric field, inductor

1. まえがき

架空送電線の工事や保守作業を行うときには作業回線の送電を停止するが，作業をしない回線については作業中も送電を継続しているのが一般的である。この送電回線を流れる電流によって，作業回線には商用周波数の電磁誘導電圧が発生する。これによる感電事故を防止するために，作業回線の電線を一定区間ごとに両端の鉄塔に接地して工事や保守作業が行われている。しかしながら，ラジオやテレビの放送所の近傍にある送電線では，接地された鉄塔間の送電線に大きな高周波電界が誘導される場合があることが，以前から指摘されてきた⁽¹⁾。

筆者らは，作業を行う前に危険な径間を数値解析により予測する方法を示し，大きな誘導電界が共振によって発生

するメカニズムを明らかにしてきた^{(2)~(4)}。また，インダクタを用いて商用周波数と高周波による誘導電界を同時に低減する方法を提案し，上線，中線，下線の3本の電線によって構成されるループが共振している径間について，この誘導低減方法が有効であることを数値計算と測定によって示した^{(5)~(9)}。これら3本の電線は，通常の送電中の状態ではがいしによって電線と鉄塔が絶縁状態になっているため，電線と鉄塔の間に容易にインダクタを取り付けることができる。しかしながら，送電鉄塔の塔頂部に張られている架空地線については，常に鉄塔に接続されている構造上，インダクタを取り付けるのが困難である。従って，ループに架空地線が含まれる場合にも3本の電線にインダクタを取り付けることになるが，その効果については検討されていない。

そこで本論文では，文献(2)~(9)とは異なり，放送波によって共振するループに架空地線が含まれる径間を取り上げ，架空地線以外の3本の電線にインダクタを取り付けた場合の誘導電界の低減効果について検討する。まず，本論文で取り扱う径間の概要について説明し，次にその径間の

接地時における電界強度の周波数応答及び、共振電流分布を数値計算によって求め、その径間の共振構造を明らかにする。また、誘導電界を低減するためのインダクタンス値を明らかにするために、電界強度のインダクタンス特性を数値計算によって明らかにする。最後に、通常の接地状態の場合とインダクタを用いて接地した場合について、電界強度を測定した結果を数値計算結果とともに示す。

2. 径間の概要

中波ラジオ放送波によって大きな誘導電界が発生する径間付近の放送用アンテナと送電線の配置図を図1に示す。文献(4)、(9)では鉄塔1と鉄塔2の径間(鉄塔間距離=212m)について解析と実験を行ったが、本論文では鉄塔3と鉄塔4の径間(鉄塔間距離=202m)を取り上げる。この径間では、通常2回線で154kVの送電が行われており、放送波によって大きな誘導電界が発生することが経験的に知られている。表1にはこの2基の鉄塔の高さ、送電線の位置、近傍にある2カ所の放送アンテナまでの距離及び鉄塔間の距離を示す。この表に示すように2カ所のアンテナは、この径間から600m以内と近い位置にある。表2にはこの2カ所の放送アンテナの周波数、出力及びアンテナ高を示す。本論文では、アンテナ1とアンテナ2から送信される放送波をそれぞれ放送波1、放送波2と呼ぶことにする。なお、放送波2は国内では最大出力の中波放送波の一つである。

図2には、インダクタを用いた商用周波数と放送波の誘導電界を同時に低減する方法を示す。インダクタを鉄塔の腕金上に固定し、インダクタの片方の端子を鉄塔に接続する。もう一方の端子は、接地線を用いてジャンパー線に接続する。インダクタは、商用周波数の様な低周波数ではインピーダンスが小さいので送電線を直接接地している状態に近い。一方、ラジオ放送波ではインピーダンスが大きくなり、送電線と鉄塔を絶縁した状態に近くなる。このようにして、インダクタにより商用周波数とラジオ放送波の両周波数における誘導電界を低減する。

3. 数値シミュレーション

<3・1>数値解析手法と計算モデル 本論文では、送電線や架空地線に誘導する電界や電流を数値的に解析するために文献(4)、(9)と同様にRichmondのモーメント法⁽¹⁰⁾を用いる。解析モデルと座標系を図3に示す。座標系は、放送用アンテナの給電点を原点にして、放送用アンテナと鉄塔3を結ぶ線をx軸にしている。また、解析モデルは図に示すように構造を簡略化した。中波放送の周波数帯において大地は完全導体と見なせるものとして、数値計算では大地による電気影響を考慮した上下対称の計算モデルとして取り扱う。計算モデルの分割数は影響を含めて放送アンテナを9分割、鉄塔を17分割、架空地線と送電線をそれぞれ11分割として、鉄塔と架空地線及び送電線との間に接続セグメントを16カ所設けて合計147個のセグメントに分割した。

電界の観測点の位置として、3本の電線及び架空地線の

図1 送電線とアンテナの配置
Fig. 1. Location of power lines and antennas.

表1 鉄塔の諸元
Table 1. Dimensions of towers.

	Tower 3	Tower 4
Height of tower	65.9m	57.9m
Height of top wire	61.4m	53.4m
Height of middle wire	56.2m	48.2m
Height of bottom wire	51.0m	43.0m
Distance from antenna 1	395m	583m
Distance from antenna 2	277m	245m
Length of span	202m	

表2 放送用アンテナの諸元
Table 2. Dimensions of broadcasting antennas.

	Frequency	Power	Height of antenna
Antenna 1	594kHz	300kW	245m
Antenna 2	693kHz	500kW	215m

図2 インダクタの取り付け方
Fig. 2. Loading inductor.

図3 解析モデルと座標系
Fig. 3. Coordinate system and geometry of analysis.

各中心から下方向に24cm、水平方向に11cmの位置で各線と平行な観測線上とし、この位置における全電界のz成分を計算する。これは第4章において述べるように、電界測定

で得られる値と比較するためである。なお、上記の観測線上における入射電界の最大値は、放送波1と2がそれぞれ9.1V/m、15.5V/mであった。

<3・2>周波数特性 3本の電線を両鉄塔に接地したときの、電線及び架空地線近傍の電界強度 $|E_z|$ の周波数特性を図4に示す。ここで入射する放送波は、アンテナ2の地点から出力500kWで周波数を変化させて送信されているものとする。また、アンテナ長は送信周波数の波長に合せて長さが0.58波長となるように変化させた。

図4に、3本の送電線及び架空地線近傍の電界の計算値の

図4 電界強度 $|E_z|$ の周波数特性
Fig. 4. Frequency characteristics of field strength $|E_z|$.

(a)

(b)

図5 誘導電流の振幅と位相
Fig. 5. Induced current.

うち最大値を示す。両放送波の周波数において電界強度が最大となるのは下線近傍であり、その値は放送波1と2がそれぞれ343.0V/mと1919V/mである。また、電界が最大値となる共振周波数は700kHzであり、このとき架空地線と下線近傍の電界強度は100kV/m以上になる。

<3・3>電流分布 大きな誘導電界が発生する共振構造を明らかにするため、共振周波数における誘導電流の振幅と位相を求める。周波数700kHz、出力500kWで放送波が送信されているときに、3本の電線及び架空地線上を流れる高周波電流の振幅と位相をそれぞれ図5(a), (b)に示す。図5(a)から、誘導電流は主に架空地線と下線を流れており、上線と中線を流れる電流は架空地線と下線を流れる電流の半分以下であることがわかる。また、図5(b)に示す通り、架空地線と上線を流れる電流が同位相で、中線と下線を流れる電流の位相はそれらと逆であることから、これらに誘導される電流分布は図6に示すようになる。周波数700kHzの1波長は428.6mであるのに対して、架空地線と下線及び鉄塔の一部から構成されるループは436.1mであることから、このループはほぼ1波長で共振していることがわかる。

<3・4>インダクタンス特性 インダクタンスによる誘導電界の低減効果を明らかにするために、3個の同じインダクタを3本の電線と鉄塔の接続部分に1個ずつ取り付け、各送電線及び架空地線近傍の電界強度を求めた。その結果を図7(a)と(b)に示す。これらの図から、3本の電線近傍の電界強度については、例えば600μH以上のインダクタンスを選ぶことにより放送波1と放送波2の両方の放送波に対して全ての電線を100V/m以下に低減できることがわかる。なお、日本の電波防護指針では、該当する周波数の電磁界強度の指針値は管理環境で614V/m、一般環境で275V/mとなっている⁽¹¹⁾。一方、架空地線について電界強度を100V/m以下に低減できるインダクタンス値を求めると、図7(a)から放送波1に対しては75μH以下であるのに対して、図7(b)から放送波2に対しては11.5μHから13.2μHの極めて狭い範囲だけであることがわかる。このように、図6に示すような共振の周波数近傍では、インダクタを取り付けていない架空地線については、放送波2による誘導電界を低減するのが困難であることがわかる。また、次章の測定で用いる100μHのインダクタを使用した場合は、架空地線については放送波1と放送波2に対する電界強度がそれぞれ94.6V/m、930V/mであり、3本の電線については放送波1と放送波2に対してそれぞれ最大で123V/m及び97.3V/mである。

図6 電流分布の概要
Fig. 6. Schematic illustration of current distribution.

(a)

(b)

図7 インダクタンス値に対する送電線及び架空地線近傍の電界強度 $|E_z|$ Fig. 7. Field strength $|E_z|$ in vicinity of power lines and ground wire versus inductance.

4. 実測結果

本径間において送電線近傍の電界強度を測定した結果について述べる。電界プローブは台車に垂直に固定し、この台車を下線に吊り下げ移動させることにより、電線に沿って電界を測定した。電界プローブの給電点の位置は下線の中心から下方方向に24cm、水平方向に11cmである。また、電線に吊り下げた電界プローブと地上の測定器を結ぶケーブルが電界を乱すのを避けるために、光ファイバケーブルを使用した。

始めに、3本の電線を鉄塔に接地した状態における下線近傍の電界 $|E_z|$ の測定結果を計算値と共に図8に示す。放送波1の周波数では、電界の最大値は測定値が114V/m、計算値が81.6V/mである。一方、放送波2の周波数では、電界の最大値は測定値が1096V/m、計算値で1330V/mとなり、大きな値であることがわかる。測定値と計算値が合わない原因としては、電界の測定には微小ダイポールアンテナを使用しており、この校正が必ずしも十分ではないなどの理由から発生した測定誤差や、計算に用いたモデルが簡略化モデルであるため、計算値についても誤差が含まれていることが考えられる。特に放送波2の周波数で大きく異なる値と

図8 通常接地のときの下線近傍電界強度 $|E_z|$
Fig. 8. Field strength $|E_z|$ for regular short. 図9 インダクタンスを用いたときの下線近傍電界強度 $|E_z|$
Fig. 9. Field strength $|E_z|$ in vicinity of bottom conductor using inductance.

なっているのは、図4からわかるように回路の良さQが大きな共振が発生しているために、計算モデルの誤差が電界の値の大きな誤差をもたらすためであると考えられる。

次に、インダクタを取り付けた状態における下線近傍の電界 $|E_z|$ の測定結果を計算値と共に図9に示す。インダクタンス値は、放送波2による3本の電線近傍の電界を約100V/m以下に低減するために、100μHを選んだ。使用したインダクタは、鉄塔1と鉄塔2の径間における測定のときに使用したのと同じである。放送波1の周波数では、電界の最大値は測定値が226V/m、計算値が75.0V/mである。一方、放送波2の周波数では、電界の最大値は測定値が232V/m、計算値で100V/mであった。このように、インダクタを用いて接地することにより、下線近傍については放送波による誘導を低減できることが確認できた。

5. まとめ

本論文では、放送波によって大きな誘導電界が発生する径間のうち共振構造に架空地線を含む径間を取り上げ、インダクタ装荷による誘導の低減効果について検討した。

始めに、ラジオ放送波によって誘導電界が発生する径間において、誘導電界強度の周波数特性を数値計算によって

求め、共振周波数が放送波2とほぼ一致することを示した。次に、架空地線と3本の電線を流れる誘導電流分布を数値計算によって求めた。その結果、架空地線と下線とそれらを支える鉄塔の一部が、放送波2に対してほぼ1波長のループを構成して大きな誘導電流が流れることを明らかにした。また、架空地線と3本の電線の近傍で観測される電界強度のインダクタンス特性を数値計算によって求め、3本の送電線については誘導電界を抑圧することができるが、架空地線近傍の電界を十分に抑圧することは困難であることを示した。最後に、通常の接地の場合とインダクタを用いて接地した場合について下線近傍の電界強度を測定した結果を示し、インダクタを用いて誘導電界を低減する方法の効果を確認した。

本論文によって、共振構造に架空地線を含む径間についてもインダクタを用いて接地する方法が有効であることを明らかにした。インダクタを取り付けることが困難な架空地線の誘導低減対策を明らかにすることが、今後の検討課題である。

(平成13年4月9日受付, 10月15日再受付)

文 献

- (1) 小川正浩・松本良一・西山光生・井口勝弘:「中波放送所近傍の強電磁界内を通過する送電線への誘導特性と線路保守」, 電学電力・エネルギー部門大会, 2, pp. 317-318(1995-8)
- (2) 笹森崇行・神成真利・澤谷邦男・安達三郎・小川正浩・西山光生・井口勝弘:「中波放送波によって送電線と鉄塔付近に誘起される電磁界」, 1996信学総大, B-273(1996-3)
- (3) 笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎・村井泰仁・小川正浩・井口勝弘・西山光生:「中波放送波によって送電線付近に誘起される電磁界-共振現象の解析-」, 1997信学総大, B-4-31(1997-3)
- (4) 笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎・村井泰仁・小川正浩・井口勝弘・西山光生:「中波放送波による送電設備への誘導の解析」, 信学論(B), J82-B, 4, pp. 645-652(1999-4)
- (5) 笹森崇行・神成真利・澤谷邦男・安達三郎・小川正浩・西山光生・井口勝弘:「中波放送波によって送電線近傍に誘起される電磁界の解析」, 信学技報, EMCJ 96-1, pp. 1-6(1996-4)
- (6) 村井泰仁・小川正浩・西山光生・井口勝弘・笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎:「中波放送波による送電線への誘起電界の低減対策に関する検討」, 1996電学電力・エネルギー部門大, E-202, pp. 468-469(1996-8)
- (7) 笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎・村井泰仁・小川正浩・西山光生・井口勝弘:「中波放送波によって送電線付近に誘起される電磁界-インダクタンス装荷による抑圧-」, 1996信学ソ大, B-271(1996-9)
- (8) 村井泰仁・小川正浩・西山光生・井口勝弘・笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎:「送電線への中波放送波誘起電界の低減方法に関する検討」, 信学技報, EMCJ 96-39, MW 96-91, pp. 23-28(1996-10)
- (9) 笹森崇行・澤谷邦男・安達三郎・村井泰仁・小川正浩・西山光生・井口勝弘:「インダクタンス装荷による中波放送波の送電線への誘導の抑圧」, 信学論(B), J84-B, 2, pp. 283-290(2001-2)
- (10) J. H. Richmond and N. H. Greary, "Mutual Impedance of Nonplanar-Skew Sinusoidal Dipoles," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-23, No. 3, pp. 412-414(1975-5)
- (11) 電気通信技術審議会答申:「電波利用における人体の防護指針」(1990-6)

笹森 崇行 (非会員) 1966年11月22日生。1989年3月東北大学工学部電気工学科卒業。1994年同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。同年5月同大学工学部助手。1996年4月仙台電波高専講師。1999年4月秋田県立大学講師, 現在に至る。博士(工学)。電磁波の散乱・回折, 移動体通信用アンテナ, 送電線への誘導の研究に従事。1997年電子情報通信学会学術奨励賞受賞。電子情報通信学会, IEEE会員。

澤谷 邦男 (非会員) 1949年2月21日生。1971年3月東北大学工学部通信工学科卒業。1976年同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。現在, 同大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻教授。プラズマ中のアンテナ, 移動通信用アンテナ, 電磁波の散乱・回折, アレーアンテナ, プラズマ加熱用アンテナ, 超伝導アンテナの研究に従事。工学博士。1981年電子通信学会学術奨励賞, 1988年電子情報通信学会論文賞受賞。

安達 三郎 (非会員) 1930年9月2日生。1953年3月東北大学工学部通信工学科卒業。1958年同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。以来, 今日に至るまで電磁波工学、ならびにプラズマ波動理工学に関する研究に従事。現在, 東北工業大学教授, 東北大学名誉教授。工学博士。電子情報通信学会功績賞他各賞を授賞, IEEEフェロー, 日本工学アカデミー会員, 著書「電波伝送工学(共著)」, 「電磁波工学」, 「電磁気学」等多数。

朝日 道成 (非会員) 1967年11月2日生。1990年3月東京農工大学工学部電子工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。主として, 架空送電線設備の設計・研究業務に従事。現在, 同社春日部工務所勤務。

有田 高治 (正員) 1963年10月6日生。1986年3月千葉工業大学工学部電気工学科卒業。同年東京電力(株)入社。主として, 架空送電設備の設計, 研究業務に従事。現在, 同社埼玉支店工務部送電グループ勤務。

岡村 信男 (非会員) 1973年1月24日生。1995年3月宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業。同年(株)関電工入社。主として架空送電線工事に関わる工法の研究に従事。現在, 同社電力本部送電線部勤務。