ウィンドファームの雷サージ伝搬解析

正員 安田 陽* 正員 原 武久*
正員 舟橋 俊久**

Analysis on Lightning Surge Propagation in Wind Farm

Yoh Yasuda*, Member, Takehisa Hara*, Member, Toshihisa Funabashi**, Member

Wind power generation is expected to become more important in the future distribution system. Although several prospective reports such as IEC 61400-24 and NREL SR-500-31115 indicate on insulation scheme and grounding design for lightning protection, it still seems that there are not many investigations on the problems. This paper therefore discusses lightning surge analysis using wind farm model with 2 or 10 ideal wind turbines. Changing parameters such as grounding resistance and lightning strike points, several cases were studied. As the result of the analysis using digital simulator ARENE, it is clear that the surge tends to propagate toward the end of a distribution line in a wind farm and there is possibility of insulation accidents at the other wind turbines when lightning attacks a wind turbine.

キーワード：ウィンドファーム，雷事故，接地，絶縁，ARENE

Keywords: wind farm, lightning accident, grounding (earthing), insulation, ARENE

1. まえがき

主としてヨーロッパを中心とする風力発電の導入の飛躍的拡大に伴い、電力システムへ連系する際の問題点は早くから指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。特に風力発電設備はその形状から雷被害を受けやすく、従来の電力設備とは異なる対策が必要であることも指摘され、近年この問題は重要な問題として着目されつつある^{(2)~(5)}。しかし、風力発電設備の雷事故の際のサージの伝搬に関してはあまり説明が進んでおらず、事故例の公表や解析例の報告もいくつかの先見性のある例外を除き⁽³⁾⁽⁵⁾、あまり豊富とはいえない。現段階では、事故例の解析や対策は風車メーカー各社で現場的なノウハウが蓄積されているようではあるが、学界や産業界での統一的な議論は充分成されていないといえる。特に雷被害の多い我が国においては、これらの問題点に関して今後より一層の情報公開とオープンなディスカッションが必要であると言えよう。最近では、資源エネルギー庁の委託によりNEDO 総合調査委員会が今後数年かけて日本の雷特性を踏まえた設計ガイドラインの提案を行う予定であるという動

きもあり⁽⁶⁾、今後の風力発電の発展とウィンドファームの建設増加に伴い、風力発電設備の耐雷・絶縁設計の議論はますます活発にならざるを得ないと予想される。

ウィンドファームの雷事故というと、直撃雷によるブレードの焼損や噴破、電力機器の焼損などが重大な事故として挙げられるが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、文献(2)によると電子機器・通信機器などの低圧回路での絶縁破壊事故が事故頻度としては最も多いとされている。低圧回路での事故の原因は直撃雷だけでなく、誘導雷や他の風車に落雷した際にウィンドファーム内を伝搬してくるサージによるものも考えられる。

一般に、コンバータ回路や昇圧変圧器は風車の極めて近傍にあるいは風車タワー内部に設置されることも多く、さらに近年は接地抵抗の低減や冬季雷対策のため、高圧側（系統側）に避雷器を設置し低圧側と連接接地をとる対策が施される場合が多い。したがって落雷の際、変圧器周辺で接地電位が大きく上昇すると、避雷器が大地側から線路側に逆動作し、ウィンドファーム内の配電線側へ雷サージ電流が流出する可能性もある。実際のウィンドファームにおける雷事故例でも、落雷風車のみならず、隣接した風車や比較的遠方にある風車で絶縁破壊事故が起きるケースもしばしば見られる。このような低圧側から高圧側へのサージ逆流現象は、すでに山頂などに設置される通信用鉄塔などへの落雷事故においてある程度説明が進んでおり⁽⁹⁾、同様の議論が風車タワーおよびウィンドファームにも適用できるものと考えられる。

そこで本報告ではまず、雷撃を受けたウィンドファーム

* 関西大学 工学部 先端情報電気工学科
〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35
Kansai University

3-3-35, Yamate-cho, Suita 564-8680

** (株) 明電舎 社会システム事業本部 電力・施設事業部
〒103-8515 東京都中央区日本橋箱崎町 36-2
Meidensha Corporation
36-2, Nihombashi-Hakozakicho, Chuo-ku, Tokyo 103-8515

内での雷サージの伝搬傾向を把握する目的で、風力発電機 2 機からなる簡単なウィンドファームモデルを対象に解析を行う。特に、風車と系統連系（特高）変圧器の配置状況、ウィンドファーム構内の配電線の敷設状況によって、サージの伝搬状況がどのように変化するかを把握し、ウィンドファーム内のサージ伝搬のメカニズムを考察する。さらに、より普遍的な対策方法を構築する目的で、風力発電機 10 機からなるウィンドファームモデルを対象に落雷風車の接地抵抗や落雷の位置について感度解析を行い、ウィンドファームにおける絶縁破壊事故の発生について一般的傾向を分析し把握する。

2. 風車 2 機からなるウィンドファームモデル

本章における解析では、風車と系統連系変圧器の配置によってサージ伝搬がどのように異なるのかをまず考察する。したがって、ウィンドファームの敷地を単純理想化し、2 基の風車および系統連系変圧器を 1 km ずつ直線状に配置する組み合わせを考える。すなわち細長い地形（例えば海岸線や道路沿いなど）に 2 基の風車と 1 台の系統連系（特高）変圧器を直線状に配置する組み合わせ問題を想定し、比較解析を行う。2 基の風車および系統連系変圧器を直線状に配置する組み合わせとしては、図 1 に示すような 2 通りのケースが想定できる。

2・1 解析モデル 解析の対象とするモデルは図 1 に示す通り、同じ性能条件の風力発電機 2 機からなる理想的なウィンドファームのモデルである。ここでは以下のような仮定のもとでウィンドファーム・モデルを構築した。

- ギアボックス、風力発電機、整流器およびインバータ（パワーコンディショナ）は全てひとつの組み合わせとして、60 Hz の充分安定した単一の 660 V 同期発電機として仮定する。

図 1 風車 2 機からなるウィンドファームの雷サージ解析モデル

Fig. 1. Model for surge analysis on wind farm with 2 wind turbines.

- 660 V/6.6 kV 昇圧変圧器（Y-Δ 結線）は風車タワー内に格納されているか、あるいはタワーに充分近接して設置されているものとする。また、昇圧変圧器の一次側と二次側の接地は接続されているものとする（図 2 に詳細図参照）。
- 変圧器モデルにおいては、電磁移行のみを考慮し、静電移行は無視した。これは、系統内に伝搬するサージが $100 \mu\text{s}$ 以上と比較的周期が長いものを対象としているため、ここでは電磁移行のみを考慮すれば充分だと仮定したためである⁽¹⁰⁾。
- 風車に近接した昇圧変圧器の一次側（低圧側・風車側）および二次側（高圧側・系統側）には制御回路等を保護するため避雷器が設置されているものとする。昇圧変圧器の二次側の高圧用避雷器は公称放電電流 2.5 kA の避雷器とし、そのモデルは $V_{1\text{mA}} = 8 \text{ kV}$ と仮定し折れ線近似で特性曲線を与えた。
- 系統への連系は、6.6 kV/66 kV 変圧器を介して連系されているものとする。
- その他、発電機、変圧器、送電線等のモデルパラメータは表 1 に示す通り。

なお、風車タワー周辺の接地抵抗は、 10Ω および 2Ω の場合の 2 通りを想定した。 10Ω という値は実際に施工されている風車の接地抵抗より若干大きな値であるが、風車タワーの接地として多く採用されている環状接地の接地抵抗（インピーダンス）は誘導性である場合が多く、雷サージのような周波数の高いサージが侵入した場合、定常抵抗値より大きな値になる可能性もあることも指摘されている⁽⁵⁾。したがって、このことも見越しての 10Ω という値も考慮に入れた。さらに、雷撃は波頭長 $2 \mu\text{s}$ 、波尾長 $70 \mu\text{s}$ 、波高値 30 kA のランプ波で模擬した標準雷を与え、風車のブレード先端に落雷があるものとし、接地線を通じて直接接地電極へサージが伝搬するものと想定した。なお、本報告で注目したい現象はウィンドファーム内でのサージの伝搬様相

図 2 風車タワーの雷サージ解析モデル

Fig. 2. Model for surge analysis on windmill.

表 1 解析条件

Table 1. Analysis conditions.

Wind turbine (Synchronous Generator) model		
rating power [MVA]	1.00	
direct-axis reactance X_d, X_d', X_d'' [p.u]	2.00, 0.25, 0.20	
quadrature-axis reactance X_q, X_q', X_q'' [p.u]	1.90, 0.50, 0.20	
time constants $T_{d0}', T_{d0}'', T_{q0}', T_{q0}''$ [s]	6.0, 0.03, 0.50, 0.06	
Transformer model (boost / grid)		
connection method	Y (neutral earthing) / Δ	
rating power [MVA]	1.0	10.0
rating voltage [V]	600 / 6,600	6,600/66,000
frequency [Hz]	60	60
% impedance [%]	15.7	1.57
mutual leakage inductance [mH]	18.2	18.2
Line Model		
positive- / zero- phase resistance [Ω /km] *	0.00105 / 0.0210	
positive- / zero- phase inductance [mH/km] *	0.83556 / 2.50067	
positive- / zero- phase capacitance [nF/km] *	12.9445 / 6.4723	
frequency-dependent characteristics	considered	

* : values at 60 Hz

把握と非落雷風車での絶縁破壊事故の傾向把握であるため、ここでは隣接風車などウィンドファーム内でのサージ伝搬の様相のみ注目している。ブレードの焼損損破や落雷風車自身の直撃雷による電気機器の絶縁破壊事故についての議論は他の論文に譲ることとし、ここでは特に取り扱わないこととする。解析にあたっては、EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) と同じ解析アルゴリズムを持つデジタル瞬時値解析シミュレータ ARENE⁽¹¹⁾ (ノンリアルタイム・パーソナルコンピュータ版) を採用した。なお、ARENE の計算精度については、文献 (12) に詳しく紹介されており、地絡故障事故の場合の解析結果が EMTP の場合とほぼ同等であることが確認されている。

2・2 解析結果 図 3 に ARENE による解析結果の例を示す。図 3 (a) は Case A における回路構成での雷サージ電流波形、同図 (b) は落雷風車 (ここでは風車 1 号機) の昇圧変圧器出力端 (系統側) に発生するサージ波形をそれぞれ表している。各相の電圧波形の挙動の違いは、雷撃があった瞬間の各相電圧の位相の違いによるものである。また図 (c) および (d) は落雷風車の昇圧変圧器高圧側の避雷器両端の電圧および避雷器を通過する電流波形を示している。雷サージが侵入すると避雷器は正常に動作し、制限電圧以下に抑制されるが、接地電位自体が上昇しているため、図 (b) に示されるように変圧器出力端では非常に大きな電位上昇が発生する。なお、図 (d) は電力線から大地へ向かう方向を正としているため、図に示される通り電流波形はマイナス値をとり、避雷器は大地から電力線へ逆導通していることがわかる。このように雷サージが接地極に侵入すると、連接接地を通して避雷器が逆動作し、低圧側から高圧側へサージを流出させる現象が解析結果から見て取れる。このような低圧側から高圧側へのサージ逆流現象は、山頂などに設置される通信用鉄塔などへの落雷事故⁽⁹⁾と類似した現象と言え、実際のウィンドファームにおいても、直撃雷を受けなかったにも関わらず遠方の風車に落ちた雷によ

図 3 ウィンドファーム内のサージ伝搬の様子

Fig. 3. Surge waveforms in wind farm.

て制御回路や通信設備などの低圧回路に絶縁破壊事故を来たしている原因がこの解析から裏づけられる。

さてここで、ウィンドファーム内の風車の配置とサージ伝搬の傾向について考察を試みる。ここでは図 1 のように 2 基の風車と 1 台の系統連系 (特高) 変圧器を直線状に配置する組み合わせ問題を想定し、比較解析を行う。

図 3 (e), (f) はそれぞれ Case A および Case B における

非落雷風車(ここでは風車2号機)へ達するサージ波形であるが、Case B では風車と特高変圧器の配置が逆になっただけで、Case A と比べサージ波高値が大きく抑えられていることが認められる。Case A のように風車をカスケードに配置すると、ウィンドファーム内配電線の末端へ向かうサージの波高値は大きくなりやすい傾向にあると考えられる。

また、Case B のように系統連系(特高)変圧器を中心に並列に風車を配置すると、サージはまず系統連系変圧器へ向かい、変圧器一次側(低圧側)の高圧避雷器でサージが吸収されるため、隣接風車へ到達するサージも比較的小さくなるものと考えられる。

以上の結果をまとめると、図4のような結果となり、風車配置の組み合わせによりサージの伝搬の様子が大きく異なることが明らかになった。なお、風車および特高変圧器の間隔を700m、500mなどと変化させても結果は殆ど変わらず、風車間距離ではなく風車配置がサージ伝搬様相の変化に大きく影響を与えていることも明らかになった。

このように、工事費や建設コストを度外視して絶縁・サージ対策にのみ着目すれば、ウィンドファーム内の架空配電線や地中ケーブルを敷設する際は、カスケード配置ではな

く、系統連系変圧器を中心とした並列状の風車配置が望ましいと考えられる。換言すれば、カスケード配置された風車群からなるウィンドファームの場合、落雷を受けた風車のみならず、非落雷風車でも低圧回路などの絶縁事故が起こる可能性が充分高いことが示唆される。

3. 風車10機からなるウィンドファームモデル

前章での議論をさらに進めるために、本章では風車10機がカスケード接続されたウィンドファームモデルを構築し、同様の解析を試みる。図5に風車10機からなるウィンドファームの基本回路構成図を示す。詳細条件は前章での解析と同様である。

なお、本章における解析では、落雷位置によってウィンドファーム内のサージ伝搬様相がどのように変化するかを見るために、(i) 系統側に最も近い風車1号機に落雷、(ii) 系統とウィンドファーム末端のほぼ中央に位置する風車5号機に落雷、(iii) 系統側から最も遠い風車10号機に落雷の3通りの解析を試みた。

3・1 落雷地点の違いによる考察 前章で設定した解析条件のもと、まずサージ伝搬の様相が把握しやすい接地抵抗 10Ω の場合を想定し、解析パラメータとして落雷ポイントを変えながら ARENE による解析を行った。その結果を図6に示す。観測点はすべて風車タワー近傍の昇圧変圧器出力端(高圧側)での各相電圧波形であり、比較のため全て縮尺は統一している(そのため落雷風車のサージ波形では最大値がグラフ範囲を超えている)。図中(a)列のグラフは風車1号機に雷撃があった場合、(b)列のグラフは5号機、(c)列は10号機に雷撃があった場合を示している。また、第1行のグラフは風車1号機の昇圧変圧器出力端の電圧波形であり、順に第10列の風車10号機出力端での波形まで列挙したものである。

図4 非落雷風車の受けるサージの大きさ

Fig. 4. Surge suffering to the next wind turbine.

図5 風車10機からなるウィンドファームの雷サージ解析モデル

Fig. 5. Model for surge analysis on wind farm with 10 wind turbines.

図 6 各風車に伝搬するサージ波形

Fig. 6. Surge waveforms propagating to each wind turbine.

図 7 各風車に伝搬するサージの大きさと持続時間 ($R_g = 10 \Omega$)

Fig. 7. Altitude and duration of surge propagating to each wind turbine.

まず (a) 列の 10 枚のグラフに注目すると、落雷風車 (1 号機) から離れるほどサージの大きさが減少していることが分かるが、その減少の割合は遠方へ行くほど緩慢になり、5 機目以降はサージの大きさがほとんど変わらないことも読み取れる。同様の傾向は (c) 列での風車 10 号機に落雷があった場合のケースでも確認できる。このことより、落雷風車に近接した風車だけでなく、遠方の風車へも比較的大きなサージが到達する場合もあることがわかる。

また、雷がウィンドファーム内のどの風車に落ちるかによってサージの伝搬状況が大きく異なることも図より認められる。例えば図 (a10) と図 (c1) を比較するとわかる通り、系統に最も近い風車 1 号機に落雷があった場合、そこから 9 機目にあたる 10 号機へ達するサージはその波高値や持続時間ともに比較的大きいのに対し、系統から最も遠い 10 号機に落雷があった場合、そこから同じく 9 機分離れた 1 号機へ達するサージは波高値・持続時間ともに比較的小さくなっている。図 7 はこの現象をよりわかりやすく提示するために結果をまとめたグラフである。図はそれぞれの風車に到達するサージの波高値および持続時間 (ここではウィンドファーム構内線路の定格電圧 6.6 kV を基準として、1 p.u. 以上の値が持続する時間と定義する) を解析結果の各波形から読み取りまとめたものである。ここでは風車 1 号機と風車 10 号機に雷撃があった場合を比較しているが、両者の関係は必ずしもシンメトリではないことが明らかである。この理由としては、1 号機から見ると 2 号機～10 号機が系統と並列に接続されているのに対し、10 号機は系統連系変圧器から遠く離れたウィンドファームの末端に位置していることが挙げられる。1 号機から発生し末端へ向かうサージは特に 8～10 号機付近で反射を繰り返し長く持続するのに対し、10 号機から発生したサージは 1 号機まで伝搬するだけでなく系統側へも分流し、結果として系統連系変圧器に併設されている高圧用避雷器も動作することによりそのエネルギーの大半は吸収されるものと推測できる。なお、風車および特高変圧器の間隔を 700 m、500 m などと変化させても結果は殆ど変わらず、前章の解析で得られた傾向と同様、サージ伝搬様相の変化に大きく影響を与えている要因

図 8 各風車に伝搬するサージの大きさと持続時間 (風車 5 号機に落雷)

Fig. 8. Altitude and duration of surge propagating to each wind turbine (lightning attacks on WT#5).

は風車間距離ではなく風車配置であることが明らかになっている。

また図 8 は風車 5 号機に落雷があった場合のサージ波高値・持続時間のグラフであるが、この図からも末端側の風車に到達するサージは系統側へ伝搬するサージより大きいことがわかる。この現象は、図 6 の (b1) と (b9)、(b2) と (b8) のグラフからも読み取れる。それぞれ落雷風車から等距離にあっても、サージの波高値・持続時間ともに比較的大きなサージがウィンドファームの末端部へ伝搬する傾向がわかる。

したがって以上の議論から、系統連系変圧器に近い風車に落雷があった場合、落雷風車より系統から離れた末端の風車へサージが「集まりやすい」傾向にあることが明らかになった。特に機器のスパークオーバ (フラッシュオーバ) の有無は $V-t$ 積に大きく依存するため、サージの持続時間が長いということはスパークオーバの発生確率も大きくなる可能性があることを意味している。したがって、系統より末端側の風車に万一絶縁対策が不十分な箇所があれば、その風車自身に直撃雷がなくとも比較的容易に絶縁破壊事故を起こしてしまう可能性があることが、この結果から推察できる。

図 9 各風車に伝搬するサージの大きさと持続時間 ($R_g = 2 \Omega$)

Fig. 9. Altitude and duration of surge propagating to each wind turbine.

3.2 接地抵抗値の違いによる考察 前節の解析結果は全ての風車の接地抵抗が 10Ω の場合の結果であったが、比較のため、全ての風車の接地抵抗が 2Ω の場合の解析も行った。図 7 と同様に、接地抵抗が 2Ω の場合の各風車に伝搬するサージの大きさと持続時間をまとめたものを図 9 に示す。この図からも明らかなように、接地抵抗の低減は落雷風車自身の受けるサージに関しては十分貢献しているが、他の風車に伝搬するサージの大きさは接地抵抗の値にさほど依存しない結果となることがわかる。

以上の議論より、ウィンドファーム末端部には比較的エネルギーの大きいサージが到達しやすいことが明らかになった。したがって、たとえ自分自身に落雷を受けなくとも同じウィンドファーム内の他の（特に系統側の）風車に落雷があった際、ウィンドファーム末端部で対策が充分でない場合、低圧回路などでの絶縁破壊事故が容易に予想され、十分な対策が必要であると考えられる。

なお、本研究では 10 機の風車の接地抵抗をそれぞれ様々に変化させて解析も行った。その結果、サージ伝搬の様相は落雷風車の接地抵抗のみに依存し、非落雷風車の接地抵抗は殆ど影響しないことが明らかになった。例えば、5 号機以外すべての風車の接地抵抗が 2Ω で 5 号機のみが 10Ω の高抵抗であった場合、図 7 と殆ど同様の結果が得られた。したがって、ウィンドファーム内の接地抵抗低減対策を行ったとしても、ひとつでも対策の弱い箇所があれば、ウィンドファーム全体に重大な絶縁破壊事故をもたらしてしまう可能性があることがわかる。逆に 10 号機以外のすべての風車が 10Ω であっても、10 号機のみが 2Ω の低抵抗であれば、10 号機に落雷した場合は図 9 と同様の結果となる。このことは例えば、標高や方角などの立地条件によりウィンドファーム内に落雷の受けやすい特定の風車がある場合、特定の風車のみ重点的に接地抵抗低減対策を施せばコスト的にも効果的な対策が望めることも示唆している。このように、ウィンドファーム全体の絶縁設計は風車の配置、接地抵抗、避雷器の制限電圧の適切な組み合わせなど、より詳細な解析を重ねる必要があることがわかる。

4. まとめ

本報告では、ひとつの風車が落雷を受けた際にウィンドファーム内に伝搬するサージの傾向を把握するため、まず風車 2 機からなるウィンドファームの雷サージ解析を行った。風車と特高変圧器との配置に着目して解析を行ったところ、風車が特高変圧器に対してカスケードに接続された場合、非落雷風車へ到達するサージの大きさが大きくなることが明らかになった。

また、より現実に近いウィンドファームモデルでも検討するために、風車 10 機からなるウィンドファームの雷サージ解析を行った。落雷位置や接地抵抗、風車間距離などパラメータをさまざまに変化させ感度解析を行った結果、(i) 風車に落雷があった際、ウィンドファーム内に流出するサージは、系統連系変圧器側よりも末端側の風車の方へ比較的大きなサージが到達する。(ii) 接地抵抗を低減させると落雷風車自身のサージは小さくなるが、遠方風車へ到達するサージの大きさはあまり変化しない。などの点が明らかになった。これらの結果から示唆されるように、ウィンドファームの絶縁設計には風車の配置、接地抵抗、避雷器の制限電圧などより詳細な解析を重ねる必要があることがわかる。

以上のことから、既存のウィンドファームにおいても、地形上気象上どの風車が落雷を受けやすいか？ その風車はウィンドファーム内配電システム上、電氣的にどのような位置にあるのか？ などを考慮に入れ詳細なサージ解析を行うことにより、ある風車が落雷を受けた場合、他のどの風車が被害に遭いやすいか？ どの箇所を優先的に絶縁対策を施したほうがよいか？ などがあらかじめ推測でき、効果的に対策を講ずることが可能となるものと思われる。今後、ウィンドファーム内の諸設備のさらに詳細なモデルが整備され、実際のウィンドファームを模擬したモデルを用いた絶縁事故の再現解析が各方面で進むことを期待したい。

なお、本研究の一部は、平成 15 年度関西大学学部共同研究費を受けたものの成果として公表するものである。

(平成 16 年 8 月 30 日受付、平成 17 年 1 月 5 日再受付)

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 「 風力発電システムにおける落雷と対策 」。 NEDO-NP-9814 (1999) (in Japanese)
- (2) K. Taketani: “ Lightning Protection for Installation of Wind Power Electric Generation ”, *J. IEIE Jpn.*, Vol.21, No.1, pp.40–46 (2001-1) (in Japanese)
竹谷是幸: 「 風力発電設備の雷保護 」。 電気設備学誌, **21**, No.1, 2001, pp.40–46 (2001-1)
- (3) B. McNiff: “ Wind Turbine Lightning Protection Project 1999–2001 ”, NREL Subcontractor Report, SR-500-31115 (2002)
- (4) “ Wind turbine generation systems – 24: Lightning protection ”, IEC Technical Report, TR61400-24 (2002)
- (5) 山本和男・箕輪昌幸・雨谷昭弘: 「 風力発電所落雷時の大地電位上昇に関する研究 」。 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム資料, pp.244–247 (2003-11) (in Japanese)
- (6) 荒木由季子: 「 風力発電普及政策とその動向 」。 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム資料, pp.12–20 (2003-11) (in Japanese)
- (7) S. Yokoyama and N. Vasa: “ Study on Lightning Damage of Wind Turbine Blades and Protection Method of them ”, The Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges and High Voltage, IEE Japan, ED-02-56, HV-02-40 (2002-6) (in Japanese)
横山 茂・N. Vasa: 「 風車ブレード雷害の問題点と対策の方向性 」。 電気学会放電・高電圧合同研資, ED-02-56, HV-02-40 (2002-6)
- (8) S. Yokoyama: “ Lightning Damage of Wind Turbine Blades and Protection Method of them ”, *IEEE Trans. PE*, Vol.124-B, No.2, pp.177–180 (2004-2) (in Japanese)
横山 茂: 「 風車ブレードの雷害問題 」。 電学論 B, **124**, 2, pp.177–180 (2004-2)
- (9) S. Yokoyama, H. Sugimoto, M. Wada, T. Koide, T. Kosuge, K. Nakada, and T. Urata: “ Lightning Protection of Power Distribution Lines Located in Mountainous Areas ”, CRIEPI Research Report, No.T64 (2001) (in Japanese)
横山 茂・杉本仁志・和田 勝・小出剛士・小菅 努・中田一夫・浦田恒則: 「 山頂負荷供給配電線の雷害防止対策 」。 電中研総合報告, No.T64 (2001)
- (10) T. Ueda, S. Neo, T. Sugimoto, T. Funabashi, and N. Takeuchi: “ Measurement of Transformer Transfer Voltage and a Study of its Modelling ”, *IEEE Trans. PE*, Vol.115-B, 12, pp.1494–1500 (1995-12) (in Japanese)
植田俊明・根尾定紀・杉本俊郎・舟橋俊久・竹内伸貴: 「 変圧器移行電圧の測定と解析モデルに関する検討 」。 電学論 B, **115**, 12, pp.1494–1500 (1995-12)
- (11) 吉原政昭: 「 汎用計算機を用いたリアルタイム瞬時値解析システム 」。 電学誌, Vol.122, No.5, pp.298–303 (2002-5)
- (12) F. Ciamous, G. Nimmersjo, T. Petersson, and O. Huet: Comparisons of transient simulator results in some typical power system study cases, 13th Power Systemst Computation Conference (PSCC'99) (1999-7)

安 田 陽 (正員) 1967 年 2 月 15 日生。 1989 年 3 月横浜国

立大学工学部電子情報工学科卒業。 1994 年 3 月同大学院工学研究科博士後期課程修了。 同年 4 月関西大学工学部助手, 1999 年同専任講師, 2003 年同助教授となり現在に至る。 博士 (工学) 。 現在は主として, 都市型風力発電システムの開発および分散型電源を有する電力系統のサージ問題に関する研究に従事。 1996 年度電気学会論文発表賞受賞。 電子情報通信学会, 日本シミュレーション学会, 日本太陽エネルギー学会, 日本風力エネルギー協会会員。

原 武 久 (正員) 1943 年 2 月 18 日生。 1970 年 3 月京都

大学大学院工学研究科博士課程修了。 同年 4 月京都大学工学部助手, 1975 年 4 月同助教授。 1997 年 4 月関西大学工学部教授となり現在に至る。 京都大学工学博士。 電力系統におけるサージ過電圧の解析および絶縁設計, 放電の基礎過程のシミュレーション, 有限要素法等による機器やプラズマの電磁界解析, 電力システムのニューラルネットワーク応用の研究に従事。 1974 年電気学会論文賞受賞, 1993 年日本シミュレーション学会論文賞受賞。 日本シミュレーション学会, エネルギー・資源学会, 電気設備学会, 日本大気電気学会, 放電研究グループ会員。

舟 橋 俊 久 (正員) 1951 年 3 月 25 日生。 1975 年名古屋大

学工学部電気工学科卒業。 同年 4 月 (株) 明電舎入社。 主として電力系統解析業務に従事。 琉球大学客員教授。 博士 (工学), C.Eng. (英国技術士) 。 IEE 会員, IEEE シニア会員。